Gerard Bodifée

Het VREEMDE van de AARDE

De Nederlandsche Boekhandel / Uitgeverij Pelckmans

Gerard Bodifée

HET VREEMDE VAN DE AARDE

Strakke natuurwetten en onberekenbaar leven



De Nederlandsche Boekhandel / Uitgeverij Pelckmans
Kapellen

Kapelsestraat 222, 2080 Kapellen

Omslagillustratie: Luc Van Schoor
Omslag en typografie: Studio DNB
D/1986/0055/19
ISBN 90 289 1080 8

Inhoud

Voorwoord

Zij werd door de eeuwen heen vereerd, bezongen en onderzocht maar nooit echt begrepen, de aarde. Zij is de derde planeet van de zon, nogal klein van gestalte en gevormd uit substanties die we overal in het heelal aantreffen. In het gezelschap van de andere planeten is zij op het eerste gezicht een normale verschijning. Maar er is iets aan de hand.

Kunnen zand en lucht de inspiratie opbrengen om een bloem te maken? Kunnen zich uit een bodem van water en steen gedaanten oprichten die vechten en vluchten en om zich heen kijken en vragen stellen? Kan het licht van de zon voedsel geven aan hongerige wezens?

Het kan niet. Nergens kan het, behalve hier op de derde planeet die van mateloze ambitie bezeten lijkt.

De wetenschap onderwerpt de aarde aan een nauwgezet onderzoek en geeft antwoord op vragen, maar ruimt de mysteries niet op. Iets ontsnapt aan elk begrip. Objectieve wetenschap kan niet meer de enige redelijke houding zijn waar het voorwerp van onderzoek zelf in de greep is van onredelijk gedrag.

Dit boek is geschreven in een poging iets van de aarde begrijpbaar te maken, maar het is uiteindelijk vooral een uiting van verwondering.

1

Het onaardse van het buitenaardse

De aarde is een onaanzienlijke planeet van de zon maar zij is ook wieg en woning van de mens. Buiten deze planeet strekt zich een wereld uit die ons vreemd voorkomt, fascinerend misschien, maar onherbergzaam, onaards, onmenselijk.

Waarom is de sterrenkunde een wetenschap die zovelen fascineert? Toen ik als kind de oogverblindende wereld van sterren en planeten ontdekte, ging een rilling door me als van een koortsaanval. De met sterren bezaaide hemel is van aangrijpende pracht maar het was niet in de eerste plaats daarvan dat ik bezeten werd. De werkelijkheid die zich achter het majestatisch decor verschuilt, drong tot me door. Op magische wijze werd ik meegesleurd naar werelden, ouder en authentieker dan de vertrouwde aarde, maar zo verlaten, zo onbestemd en desolaat, dat grote angst me overspoelde. Eenmaal van die realiteit doordrongen, was geen terugkeer mogelijk naar een knusse aarde als enige werkelijkheid. Vreemd genoeg, er was ook geen verlangen naar een weg terug. De angstaanjagende, afstotende realiteit trekt aan, onverklaarbaar maar onweerstaanbaar.

Onttroonde aarde

De aarde heeft steeds een bijzondere plaats in de kosmische orde ingenomen. In de Oudheid regeerde de zon het heelal. Tot in alle uithoeken verspreidde zij haar licht, schonk kracht en warmte, en deed het leven op aarde gedijen. Er was niets dat de zon in macht kon evenaren. Maar de aarde was het middelpunt. Bewegingloos lag zij op de bodem van het universum, en vormde er het centrum van het wereldgebeuren. In wijde cirkels wentelden zon, maan en sterren omheen de aarde, waar de mens leefde en zich in zoveel hoge belangstelling koesterde. Ook de planeten,

die als onberekenbare sterren langs de hemel joegen, werden verondersteld op gecompliceerde wijze de aarde te omcirkelen. Het onderscheid tussen hemel en aarde was er echter niet enkel een van plaats, maar ook een van hoedanigheid. Aan de hemel was alles licht en transparant, er heerste orde, harmonie en onvergankelijkheid. De aarde was onvolmaakt. Wanorde, leed en vergankelijkheid waren er onontkoombaar de elementen van het bestaan.

De moderne astronomie heeft dit aangrijpend wereldbeeld neergehaald. Zij onttroonde de aarde als middelpunt en wierp haar in de ruimte, als planeet tussen de planeten, wentelend rond een ster tussen de sterren. Herleid tot een stofdeeltje in de kosmos, leek voor de aarde nog slechts een onopvallend bestaan weggelegd, wezenlijk niet verschillend van dat van de ontelbare andere hemellichamen die het heelal bevolken. De zon blijft met haar licht en warmte de verwekker van al het leven, maar ook deze taak is op kosmische schaal onaanzienlijk geworden. Als ster van middelmatige grootte is zij niet meer dan een figurant in het melkwegstelsel dat honderd miljard sterren bevat.

Met wat moeite aanvankelijk, maar dan met gelatenheid, heeft de mens het nieuwe gezichtspunt aanvaard. De wetenschap dat er een eenheid in de verscheidenheid van verschijnselen bestaat, dat ook de aarde een element van het grote kosmische systeem is, geeft diepe metafysische voldoening. Het leven wint erdoor aan authenticiteit. Nu bekend is dat op aarde dezelfde bestanddelen aanwezig zijn, dezelfde processen werken op basis van dezelfde oerkrachten als in de rest van het heelal, is onze wieg en woning niet langer een gril van de goden, maar een onvervalste manifestatie van de natuurlijke orde. Mythen verdwijnen en de mens weet zich, meer dan voorheen, in de fysische wereld opgenomen.

Maar dan duikt weer een discrepantie op, een kloof tussen het beeld dat de wetenschap ophangt en een inzicht dat uit directe ervaring voortkomt. Tegenover de bewering dat de aarde slechts een onbelangrijke planeet is, in geen opzicht wezenlijk verschillend van Mars, Venus of elke andere planeet, staat de vaststelling dat onze planeet niet op de andere gelijkt. Nergens op de overige planeten wordt aangetroffen wat op aarde leeft en groeit. De biologische activiteit hier is uniek in het zonnestelsel.

In het kosmisch decor

We zullen ons in dit boek bezinnen over de plaats van de aarde en het leven in de natuur, en ons daarbij rekenschap geven van zowel wetenschappelijke inzichten als van minder geformaliseerde ervaringen. Het is waar en het is een relevant gegeven dat de aarde zoals de andere planeten

omheen de zon wentelt, dat zij is opgebouwd uit dezelfde chemische elementen als de andere planeten, manen, kometen, sterren en nevels, maar het is ook waar en even relevant dat de aarde een levend, denkend, groeiend en ondernemend organisme is, uniek in zijn realisaties en mogelijkheden. Zowel de antieke opvatting die de aarde door haar wezen en bestemming een aparte status in de kosmische orde toekent, als de gangbare moderne overtuiging dat de aarde een planeet is die zich niet wezenlijk van de andere onderscheidt, moeten daarom op misvattingen of oversimplificaties gebaseerd zijn.

De wetenschap leest moeizaam het boek van de natuur, nadat zij stukjes van het alfabet ontcijferd heeft. Beetje bij beetje geeft het heelal daardoor geheimen prijs en dringt iets van de kosmische werkelijkheid door tot hier. Sporen van wat zich afspeelt in de Melkweg en daarbuiten liggen thans opgeslagen in ons bewustzijn. Het beeld dat zich hieruit heeft gevormd, situeert onze planeet in het kosmisch bestel, en is stilaan vertrouwde wetenschap geworden.

Als één der negen planeten van het zonnestelsel, wentelt de aarde in een vrijwel cirkelvormige baan met een straal van 150 miljoen kilometer omheen de zon, het centrale object van heel het systeem. Twee planeten, Mercurius en Venus, lopen nog dichter bij de zon. De overige bevinden zich op banen die buiten de aardbaan gelegen zijn. De verste, Pluto, staat bijna veertig maal verder dan de aarde van de zon.

Alle planeten werden gevormd door condensatie van gassen in een nevel waaruit ook de zon ontstond. Deze laatste is een ster van eerder bescheiden afmetingen, één van de zowat honderd miljard die samen een uitgestrekte groepering vormen, het melkwegstelsel. Tussen de sterren in het melkwegstelsel zweeft ijl gas en stof, op sommige plaatsen te zien als lichtende nevels of donkere wolken. De Orionnevel is hier een voorbeeld van. Door samentrekking van het gas onder invloed van de gravitatie, kunnen zich uit deze nevels nieuwe sterren vormen. Binnen de sterren is de materie zo sterk samengedrukt en verhit dat kernreacties optreden waarbij uit lichte elementen zwaardere worden gemaakt. De energie die bij deze reacties vrijkomt, wordt onder de vorm van licht de ruimte ingestraald. De massa van planeten is te gering om de druk en temperatuur in het inwendige te bekomen die nodig zijn om de kernreacties op gang te laten komen. Planeten stralen daarom geen eigen licht uit. Het onderscheid tussen sterren en planeten is er wezenlijk slechts een van gewicht: sterren zijn zwaarder. De aarde is, zo bekeken, enkel een te klein uitgevallen ster.

Er komen miljoenen melkwegstelsels voor in het heelal. De afstanden die hen van elkaar scheiden zijn zo reusachtig dat het licht zelf, dat zich van alle natuurverschijnselen met de grootste snelheid voortplant, er in de

meeste gevallen miljoenen, soms miljarden jaren voor nodig heeft om de kloof te overbruggen. De zon gaat in dit grandioos decor verloren als een volstrekt onbelangrijke stip. De aarde verdwijnt naast de zon in het niet.

Waarschijnlijk bevinden de meeste, misschien alle, sterren zich in het gezelschap van planeten, maar dat vermoeden kan nog niet door rechtstreekse waarneming bevestigd worden. De afstanden tot zelfs de meest nabijgelegen sterren zijn zo groot dat het niet mogelijk is eventuele planeten bij andere sterren te onderscheiden, zelfs niet met de krachtigste telescopen. Omdat de zon in alle opzichen een normale ster is, kan echter aangenomen worden dat zich ook bij andere sterren de processen hebben afgespeeld die bij de zon tot de vorming van een planetenstelsel geleid hebben. Bovendien is uit infrarood waarnemingen rechtstreeks gebleken dat bij sommige jonge sterren de stofwolk nog aanwezig is waaruit door samentrekking en condensatie planeten kunnen ontstaan. Er kan nauwelijks twijfel over bestaan dat de aarde in het heelal meer soortgenoten heeft dan enkel deze van het eigen zonnestelsel. Talrijker nog dan de sterren, zijn de planeten in het heelal, al blijven zij door hun nietigheid en afstand voor het oog verborgen.

Het beeld dat de wetenschap zich van de positie van de aarde in het heelal gevormd heeft, is bevattelijk en overtuigend. Het houdt ook een boodschap in. De aarde is voorbestemd in deze kosmische oceaan een onbeduidende druppel te zijn, een anonieme brok materie die zijn minuscule bijdrage levert tot het geheel, maar er niet in slaagt enige eigen betekenis te verwerven.

Toch knaagt oeroude twijfel voortdurend aan deze zekerheid.

Oase

De aarde is niet enkel gecondenseerde en uitgekristalliseerde massa in een baan omheen de zon; ze is ook bron, onderkomen en voedsel van het leven. Ze is schepper van het denkend verschijnsel dat wijzelf zijn. Ze ontplooit gedragingen die niet kunnen worden toegekend aan haar ingrediënten, steen, ijzer, water en lucht. Op geen der andere planeten van het zonnestelsel hebben zich vormen, gedachten en complexe verbanden ontwikkeld als hier. Het is de paradox van de moderne wetenschap dat zij de aarde in het geheel van de kosmos integreerde en haar daarbij tot een hemellichaam van onbelangrijke allures herleidde, maar anderzijds dient te erkennen dat deze planeet zich op bijzondere wijze onderscheidt. Het leven op aarde is niet een regelmatig en voorspelbaar gedrag van de materie; de oppervlaktegesteldheid van de aarde is niet een normale toestand die elders nog voorkomt. Er is iets ongewoons, iets frappants aan

deze planeet waardoor zij een rol speelt die van grotere betekenis moet zijn dan wat in overeenstemming lijkt met haar louter fysische kenmerken.

Op het eerste gezicht laat niets vermoeden dat onze planeet voorbestemd was zich op zo aparte wijze te onderscheiden. De aarde behoort, samen met Mercurius, Venus en Mars, tot de groep van steen-ijzer planeten, waarvan de banen het dichtst bij de zon gelegen zijn. De aarde is de grootste van het viertal, maar verschilt in afmeting betrekkelijk weinig van de andere. In het bijzonder Venus lijkt naar grootte en chemische samenstelling sterk op de aarde. Mars heeft een diameter die maar half zo groot is. Mercurius is nog wat kleiner. Alle hebben ze, behalve Mercurius, een atmosfeer, een bestendige laag gassen boven het oppervlak. Mercurius staat zo dicht bij de zon, en heeft zo'n geringe massa dat door de hoge temperatuur en zwakke zwaartekracht van deze planeet gasvormige stoffen snel kunnen ontsnappen. De overige planeten zijn beter in staat hun atmosfeer vast te houden. Venus heeft een erg compacte, steeds bewolkte dampkring, terwijl Mars een veel ijlere, maar soms nogal stoffige atmosfeer bezit. Al de genoemde planeten hebben weinig manen; Mercurius en Venus bezitten er helemaal geen, de aarde één, en Mars heeft twee hele kleine maantjes, nauwelijks twintig tot dertig kilometer groot.

Al deze kenmerken wijzen op verschillen, maar niet op een bijzondere hoedanigheid van de aarde. Onze planeet slaat een normaal figuur onder haar buren in het zonnestelsel.

Het beeld verandert enigszins bij een meer gedetailleerde kijk, zoals door het ruimte-onderzoek mogelijk gemaakt. De oppervlaktegesteldheden en atmosferische omstandigheden van de vier binnenste planeten lopen sterk uiteen. Onder het vertrouwd aandoende witte wolkendek van Venus gaat een oppervlak schuil dat elke gedachte aan de aarde of het leven tot een irreëel sprookje herleidt. Een verpletterende atmosferische druk, een temperatuur waarbij lood en zink smelten, en zwavelzuurconcentraties toveren het Venusiaanse landschap om tot een hel. Mars toont een ander uiterste. De lucht is er zo ijl als in de aardse atmosfeer op veertig kilometer hoogte; de bodem is kaal, bevroren en steriel. Mercurius is een geblakerde woestenij. Geen enkele van deze planeten maakt een aardse indruk, waarbij 'aards' nog niet hoodzakelijk hoeft te betekenen dat de planeet een herbergzaam oord zou zijn voor leven zoals dat op aarde voorkomt. Op elk der genoemde planeten ontbreekt het aan elke vorm van activiteit of organisatie die uitstijgt boven de louter fysische en chemische wisselwerkingen van bodem en dampkring. Die rust en onbedreigde stabiliteit steken scherp af tegen de rusteloosheid en fragiliteit van het aardse milieu, en dat is het wat hen zo on-aards maakt. Op aarde houden zee, lucht en bodem een biosfeer in stand, een chemisch zeer actieve en gestructureerde laag, gevormd door organismen van de meest

uiteenlopende vormen en gedragingen. De samenstelling ervan is buitengewoon complex en dient voortdurend op actieve wijze te worden onderhouden tegen de afbraakwerking van spontane chemische processen. Niets vergelijkbaars wordt op andere planeten aangetroffen.

Verder aan de buitenkant van het zonnestelsel liggen de banen van de grote waterstof-planeten, Jupiter, Saturnus, Uranus en Neptunus. Over de aard en samenstelling van de verre en kleine Pluto is weinig geweten. Deze zogenaamde joviaanse planeten en hun talrijke manen bieden een rijke waaier aan kleuren, vormen en landschappen, maar overal is overeenkomst met de aarde nog verder te zoeken. Jupiter bezit een atmosfeer die door gigantische wervelingen getekend is, een woelige ketel waarin geen vast punt voorkomt. De vier grote Jupitermanen zorgen voor gevarieerd spektakel: Io, met haar zwavelspuwende vulkanen; Europa, bedekt met ijsschotsen; Ganymedes, met een doorgroefd en verwrongen reliëf; en Callisto, een slagveld waar de kraters elkaar overlappen. Alle joviaanse planeten (behalve misschien Neptunus) bezitten fraaie ringenstelsels, die vooral bij Saturnus spectaculaire afmetingen aannemen.

Al deze exotische taferelen nemen niet weg dat grote troosteloosheid over deze manen en planeten ligt. Steen, ijs, gas is er in overvloed, maar niets dat deze substanties overstijgt. Er is materiaal, maar geen voedsel. Er is niemand om kracht te putten uit het reservoir. Er zijn geen zintuigen om de natuur te observeren. Ondanks de onstuimigheid is alles passief en dood. Nergens verzet tegen de natuurwetten, nergens vrijheid, nergens gedachten, gevoelens...

Voor wie op aarde leeft, maakt het zonnestelsel, ondanks de ruimte, een beklemmende indruk. Mensen voelen er zich niet thuis. Wij leven hier, op aarde, in een oase.

Wellicht voor het eerst drong dit gevoel acuut en collectief door tijdens de maanvluchten van het Apollo-programma. De maan, ooit door dichters en dromers bezongen, was nochtans reeds eerder door de wetenschap als een onaanlokkelijk, kaal en grijs rotslichaam ontmaskerd. Er gaat minder bekoring uit van dit stoffig oord dan van een berg sintels. Toch mobiliseerde deze maan het publiek en haar politieke leiders. Project Apollo ging van start en werd gedurende tien jaar een Amerikaanse nationale onderneming met de hoogste prioriteit. Opnieuw die populariteit van het buitenaardse, nu omgezet in concrete actie. Opnieuw die aantrekkingskracht van het afstotelijke.

Pas toen het ogenblik van de triomf was aangebroken en de oogst werd binnengehaald, drong de toedracht in volle duidelijkheid over. Koffers met stenen waren de vruchten meegebracht uit de nieuw veroverde wereld. De desolate en kouwelijke aanblik van de maan zelf, via de televisie voor het eerst breed uitgestald, werd al gauw een pijnlijke confronta-

tie. Het Apollo-project werd, op wat het hoogtepunt van zijn succes had moeten zijn, stopgezet.

De mens zal, geloof ik, naar de maan terugkeren, maar dan zal het niet meer als speelvogel of als succesjager zijn. De afkeer van dit onvruchtbaar oord is groot nu, en alleen de intentie om er de stempel te drukken van wat aards en menselijk is, kan een motief geven er weer te keren. Zodra de maan opnieuw in de belangstelling komt, zal het zijn om van deze maan een nieuwe aarde te maken.

Andere ruimtevluchten die ook in de jaren zestig en zeventig ondernomen werden, maar dan door onbemande toestellen, hebben tot het onbehaaglijke gevoel bijgedragen. Mars, de planeet die als geen ander in een sfeer van romantiek en droom zweefde, ontpopte zich meer als een tweede uitgave van de maan dan als een tweede aarde. Venus verloor haar charme zodra televisie-ogen onder het wolkendek blikten. En Mercurius, die het bezoek kreeg van Mariner 10, bleek enkel nog voor fanatieke kratertellers interessant.

Verwondering en eenzaamheid

Is er dan toch een bevoorrechte plaats voor de aarde in het kosmisch bestel? De klassieke kosmologie met een aarde als onvolmaakt en vergankelijk oord onder een hemel van mathematische perfectie en eeuwigheid is in geen enkel opzicht weergekeerd. Het beeld dat de astronomie van het heelal ophangt, bevredigt niet meer diegene die naar orde en onveranderlijkheid hunkert. Alle sereniteit van de nachtelijke hemel ten spijt, schuilt achter het sterrengordijn een woelige wereld van geweld en ondergang, waar sterren de atomen in hun binnenste vermorzelen en zelf onder heftige stuiptrekkingen sterven. De hoop in de hemelse sferen volmaakte orde en harmonie aan te treffen, is sinds de dagen van Kepler en Newton vervlogen. Het ongewone van de aarde komt daarom niet voort uit een tegenstelling van orde en chaos tussen hemel en aarde, of van eeuwigheid en vergankelijkheid; de tegenstelling is van andere aard, eerder van appreciatie dan van maat, van kwaliteit dan van vorm. Er is een verschil in waarde tussen een bloem op aarde en een steen van de maan. Het verschil is subjectief maar ook intrinsiek. Een plant of een dier vertegenwoordigt een streven dat in henzelf aanwezig is en dat door henzelf tot uiting wordt gebracht. Een steen is het resultaat van een blinde natuurwet en vertegenwoordigt niets.

De gedachten hier uitgedrukt, zijn zelf een uiting van het onderscheid tussen de aarde en de overige planeten. De aarde vormt zich door middel van de mens een oordeel over zichzelf. Noch de maan, noch Mars,

noch een andere planeet verdedigt zich tegen deze discriminatie. Onverschilligheid is hun enige reactie.

De aarde is een vreemd lichaam in dit heelal. De verwondering daarover breekt door. Een gevoel van onwennigheid en eenzaamheid is nu haast onontkoombaar geworden. We zijn eenzaam, hier op aarde, en voelen ons vreemd in een heelal dat ons niet kent, niet op onze maat gesneden is en met ons geen rekening houdt. De warmte van het aardse nest is de enige werkelijkheid die telt. Al de rest is een nachtmerrie. Zolang niet ergens in het buitenaardse sporen gevonden worden van wat op aarde de essentie is, leven — leven als drager van bewustzijn en gevoel, leven als vorm van vrijheid, leven dat groeit en complexiteit verkiest boven stabiliteit, zolang blijft de wereld van het buitenaardse ook een wereld van het on-aardse.

2

Een buitengewone straler

Als kleine planeet verdwijnt de aarde in het niet naast de zon. Toch slaagt zij erin zich tot diep in het melkwegstelsel kenbaar te maken. Waar de zon in een gordijn van sterren oplost, staat de aarde haar bestaan uit te schreeuwen.

Wij zijn door afkomst en aanleg gehandicapt om het onderwerp dat ons hier bezig houdt met de nodige onbevangenheid en vanop voldoende afstand te beschouwen. Afkomstig van de aarde, zijn we tot in het diepst van ons denken door deze vertrouwde planeet getekend. Hoe zouden we in staat zijn ons over het vreemde van de aarde te verbazen? Laten we daarom een denkbeeldig wezen ter hulp roepen, dat geen verwantschap heeft met de aarde en nooit eerder van het bestaan van onze planeet op de hoogte was.

Ik heb er geen idee van hoe deze buitenaardse derde eruit zou kunnen zien, maar we zullen ons met dergelijke details niet inlaten. Gemakshalve stellen we hem menselijk voor, alleszins begaafd met een waarnemingsvermogen en intelligentie die overeenkomen met de onze, al worden daardoor ongetwijfeld toch weer typisch aardse vooringenomendheden geïntroduceerd. Hieraan helemaal ontkomen zal wel niet mogelijk zijn. We kunnen er slechts op letten dat de vreemdeling in ons verhaal geen voorafgaande informatie of opvattingen over onze planeet bezit.

Laten we het buitenaardse wezen ergens in de diepten van de interstellaire ruimte plaatsen en hem van daaruit zijn waarnemingen doen verrichten. Daar, op vele lichtjaren afstand van het zonnestelsel, is de aarde volledig van het toneel verdwenen. De zon zelf gaat als onopvallende ster op middelbare leeftijd ten onder in het onontwarbaar sterrenveld van de Melkweg. De nietigheid van de aarde is hier een simpel en onbetwistbaar feit. Als kleine planeet van een bescheiden ster, kan zij slechts een verwaarloosbaar stofje zijn in het melkwegstelsel. De aanwezigheid van dit gehucht in het wijde galactisch landschap is een detail, minder opvallend dan een molecule in de lucht.

De zon straalt, als alle normale sterren, vooral licht maar ook wat

radiostraling uit. Deze radio-emissie is echter zo zwak dat zij over interstellaire afstanden volstrekt onwaarneembaar is. Het is daarom dat onze interstellaire waarnemer, die is uitgerust met een gevoelige radiotelescoop, met verbazing zou vaststellen dat er toch opmerkelijk sterke radiostraling uit de richting van de zon komt. Deze straling is niet alleen veel intenser dan normaal door een ster van een type zoals de zon wordt uitgezonden maar zij vertoont ook vreemde karakteristieken. De straling is geconcentreerd in talrijke zeer smalle frequentie-gebieden, en de intensiteit en frequentie ervan schommelen op vreemdsoortige wijze.

Doppler-effect

Onderstellen we dat de waarnemer door het verschijnsel geboeid wordt en de zaak verder onderzoekt. We nemen aan dat hij beschikt over waarnemingsapparatuur vergelijkbaar met wat thans hier op aarde bestaat, zodat aan de technische verwezenlijkbaarheid ervan niet getwijfeld hoeft te worden. Ook zijn kennis van natuurkunde wordt aangenomen overeen te komen met het peil van de huidige wetenschap op aarde. Spoedig nadat hij zijn waarnemingen van de mysterieuze radiobron heeft aangevat, stelt hij vast dat de variaties in frequentie niet willekeurig, maar systematisch verlopen en dezelfde zijn voor alle frequenties waarop de straling actief is. De verschuivingen hebben een vaste periode en gebeuren ook steeds met eenzelfde amplitude. Ongetwijfeld komt hij tot een voor de hand liggende verklaring: de radiostraling is niet afkomstig van de zon zelf, maar van een bron die op een baan omheen de zon wentelt. De bron kan dan op constante frequenties uitzenden en de waargenomen frequentie-veranderingen zijn een gevolg van de snelheidsveranderingen in de kijkrichting. Doordat de bron zich tijdens haar omlopen nu eens naar de waarnemer toe en dan weer van hem weg beweegt, verandert de frequentie die wordt opgevangen. Dit is het Doppler-effect, welbekend uit de elementaire natuurkunde.

In het kort komt het hierop neer. Wanneer een bron golven met een bepaalde frequentie uitzendt, zal een waarnemer die zich beweegt ten opzichte van deze bron een andere frequentie meten. Indien bron en waarnemer zich naar elkaar toe bewegen, stelt de waarnemer een frequentie vast die hoger is dan de frequentie waarmee de golven door de bron worden uitgezonden. De golflengte is overeenkomstig korter. Als waarnemer en bron zich van elkaar verwijderen doet zich het omgekeerde voor: de vastgestelde frequentie is nu lager en de golflengte groter.

Het Doppler-effect is verklaarbaar door de aard zelf van het golfverschijnsel. De zich voortplantende golven bestaan uit een opeenvolging

van toppen en dalen die zich met een welbepaalde snelheid voortbewegen. Bij radiogolven gaat het om de maxima en minima van electromagnetische trillingen. Het tempo waarin de golven (en dalen) elkaar opvolgen bepaalt de frequentie. Nauwkeuriger uitgedrukt: de frequentie is het aantal golftoppen dat per seconde een bepaalde plaats passeert. Indien een waarnemer zich naar de trillingsbron toe beweegt zullen voor hem de golftoppen elkaar sneller opvolgen omdat zich bij de golfsnelheid ook de eigen snelheid van de waarnemer voegt. De frequentie is dan hoger. Omgekeerd zullen de golven de waarnemer met grotere tussentijden bereiken indien deze zich van de bron af beweegt; de frequentie is dan lager.

Een radio-stralende planeet

Als onze interstellaire waarnemer bekend is met het feit dat rond sterren in het algemeen planeten wentelen, zal hij besluiten dat de geheimzinnige radiobron zich zeer waarschijnlijk op één van de planeten van de zon bevindt. Het raadsel neemt daarmee echter nog scherper vormen aan. Geen enkel natuurlijk fysisch proces is immers bekend (naar we aannemen ook niet voor het interstellaire wezen) dat op planeten werkzaam is om radiostraling met een dergelijke intensiteit op te wekken. Ook het feit dat de emissie in zo smalle frequentiebanden gebeurt, lijkt onverklaarbaar.

De raadselachtige straling die daar, ver in het melkwegstelsel, opgevangen wordt, vindt ook niet zijn oorsprong in een natuurlijk verschijnsel. Het is de zwakke restant van verdwaalde radar-, radio- en televisiesignalen, door ons hier op aarde uitgezonden. Het is het geroezemoes van de menselijke activiteit, hoorbaar tot ver in de interstellaire ruimte. Laten we voor een goed begrip, vooraleer de naspeuringen van onze waarnemer verder te volgen, enkele van de kenmerken, en dan vooral de ontvangstmogelijkheden van deze radiostralingen hier kort bespreken.

De radio- en televisie-uitzendingen waarvan de mens gebruik maakt, werken in een breed frequentiegebied, al straalt elke zender slechts uit in een smalle band. Alle gebruikte banden liggen echter verspreid in een breed gebied, dat vrijwel heel het electromagnetisch spectrum omvat van ongeveer 10 kilohertz, voor onderzee-verbindingen, tot meerdere gigahertz, voor satellietcommunicatie. Bijna alle signalen met een frequentie die lager ligt dan ongeveer 20 megahertz, worden gereflecteerd of geabsorbeerd door de ionosfeer, een elektrisch geleidende laag hoog in de aardse atmosfeer. Deze laagfrequentie straling bereikt dus niet de buiten-

aardse ruimte. Wat echter een hogere frequentie heeft, kan — en zal gedeeltelijk ook — ontsnappen.

Voor een ver verwijderde waarnemer zullen vooral de videodraaggolven van de commerciële televisiestations in West-Europa en Noord-Amerika, en de krachtige bundels van militaire radarposten opvallende signalen zijn. Deze uitzendingen moeten tot op waarlijk astronomische afstanden kunnen worden opgevangen. Dat zij binnen een smalle bandbreedte een zeer hoog vermogen uitstralen, is wat hen, bij een juiste afstemming, zo opvallend maakt. Tegelijk ook is het dit, wat deze stralingen onderscheidt van bekende natuurverschijnselen.

Tot de krachtigste zenders met interstellair bereik behoren de BMEWS radar-installaties (Ballistic Missile Early Warning Systems). De Verenigde Staten hebben een dergelijk radarnetwerk in gebruik op hoge noordelijke breedte voor de vroegtijdige opsporing van een eventuele vijandelijke raketaanval die het land over de noordpool zou kunnen bereiken. De antennes van het systeem stralen 400 MHz golven uit die over de horizon zwiepen en dan de aarde verlaten. Met hun hoge vermogens, uitgestraald binnen een bandbreedte van 1 kHz, zijn deze BMEWS radars verantwoordelijk voor de meest intense radiostraling die van de aarde ontsnapt. Een radiotelescoop met een antenne van 300 meter diameter, van hetzelfde type als deze van Arecibo in Puerto Rico, zou de BMEWS signalen kunnen opvangen tot op een afstand van 20 lichtjaar (de dichtsbij gelegen ster bevindt zich op 4.3 lichtjaar afstand). Een nog gevoeliger instrument dat, hoewel op dit ogenblik op aarde niet voorhanden, technisch wel realiseerbaar is, moet deze uitzendingen tot op honderden lichtjaren afstand kunnen detecteren.

Militaire radars zijn zeker niet de enige stemmen waarmee de aarde en haar bewoners hun bestaan in het heelal uitschreeuwen. Duizenden FM radiostations zenden uit in het frequentiegebied tussen 88 en 108 MHz, met een totaal vermogen van meerdere honderdduizenden kilowatt. Hoewel slechts ongeveer tien procent van dit vermogen in de draagfrequentie zit, hebben deze FM uitzendingen vanwege hun extreem kleine bandbreedte (0.1 Hz) toch een groot spectraal vermogen, een grote energie-uitstraling dus per hertz. Indien op de juiste golflengte wordt afgestemd moet het daarom mogelijk zijn deze uitzendingen tot op zeer grote afstand te ontvangen.

De ontvangstmogelijkheden van televisiesignalen, waarvan de frequentie begrepen ligt tussen 40 en 890 MHz, reiken nog verder dan die van de radio. Hoewel televisie van de veel grotere bandbreedte van ongeveer 5 MHz gebruik maakt, wordt de helft van dit vermogen in de draaggolf zelf uitgestraald, waarvan de bandbreedte niet meer dan 0.1 Hz bedraagt. De rest bevat de eigenlijke informatie-inhoud van het signaal en is

op een complexe wijze over het kanaal verdeeld. Het uitgezonden televisieprogramma heeft daardoor een veel kleiner spectraal vermogen dan de draaggolf en zal overeenkomstig hiermee, moeilijker te ontvangen zijn. Er zijn op dit ogenblik ongeveer drieduizend TV zenders op aarde die in het UHF gebied (460-890 MHz) actief zijn met een vermogen van honderd tot duizend kilowatt per zender. De draaggolven van deze uitzendingen moeten met een ontvanger van het Arecibo-type tot op enkele lichtjaren afstand kunnen worden opgevangen. De programma-inhoud zelf ontvangen is ongeveer tienduizend maal moeilijker en zou met een technologie van het huidig niveau op aarde, over interstellaire afstanden niet mogelijk zijn. Ik wil hier in het midden laten of dit als een troost of als een uitdaging moet worden opgevat. Wat onze waarnemer in de Melkweg betreft, het is redelijk aan te nemen dat hij in staat is ons te horen, maar ons niet kan verstaan. Het medium dringt door, de boodschap niet.

Dit betekent allerminst dat deze uitzendingen voor hem zonder betekenis moeten zijn. Het tegendeel is waar. Het is verrassend hoeveel informatie een aandachtige en intelligente waarnemer uit deze signalen kan putten, ook al zijn ze niet voor hem bedoeld en kan hij de inhoud ervan niet vernemen.

De aarde ontsluierd

Een opvallend kenmerk van de straling is vooreerst haar intensiteit. Indien deze radiogolven thermische straling zouden zijn, wat betekent dat zij opgewekt werden louter als gevolg van de temperatuur van het stralend voorwerp, dan zou deze intensiteit op een onvoorstelbaar hoge waarde wijzen voor deze temperatuur, minstens enkele miljoenen graden Celsius. De zon zelf heeft een oppervlakte-temperatuur van nog geen 6 000 graden Celsius. Zoals eerder besproken, kan de waarnemer uit de regelmatige frequentieveranderingen van het signaal afleiden dat de bron zich waarschijnlijk op een planeet bevindt die omheen de zon wentelt. Het is daardoor volstrekt uitgesloten dat de radiostraling van thermische oorsprong is. De temperatuur is veel te hoog voor de zon en dit is des te meer zo voor een planeet die geen eigen warmte opwekt maar enkel zonnewarmte ontvangt. Het is bovendien om een andere reden ook duidelijk dat de straling niet van thermische oorsprong kan zijn: zij vertoont niet het typische continue intensiteitsverloop als functie van de frequentie dat men bij elke thermische straling aantreft. In plaats daarvan bezit het spectrum een uitgesproken lijnenkarakter: al het vermogen wordt uitgezonden in een aantal smalle, scherp van elkaar gescheiden frequentiebanden.

De straling is niet constant maar wisselt, zoals gezegd, in een vast ritme. De schommelingen zijn te zien in intensiteit en in frequentie. De frequentie-veranderingen kunnen eenvoudig verklaard worden door het Doppler-effect als de bron zich op een planeet bevindt, maar de variatie in intensiteit, het periodiek aan- en uitflitsen van de emissies, vraagt een andere uitleg. De waarnemer kan door systematische metingen vaststellen dat de belangrijkste intensiteitsschommelingen een periode hebben van 24 uur. De frequentie van de emissie-lijnen varieert met een periode die 365 maal langer duurt, en deze laatste periode kan dus geïnterpreteerd worden als de omlooptijd van de planeet om de zon.

De vele emissielijnen met elk hun eigen karakteristieken wijzen erop dat meer zenders actief zijn op de bron-planeet. Al deze zenders verdwijnen en verschijnen met een periode van 24 uur, maar doen dat niet gelijktijdig. Dit wijst erop dat de radiobronnen zich verspreid op een planeet bevinden die om haar eigen as wentelt, waardoor de verschillende bronnen beurtelings naar de waarnemer toe gericht zijn, en zich weer van hem afwenden. De rotatieperiode zou dan de gemeten 24 uur bedragen. Dit vermoeden kan bevestigd worden door nauwkeurige frequentiebepalingen die ook de Doppler-verschuivingen aan het licht brengen, geassocieerd met deze 24 uur periode. Ook tengevolge van de aswenteling van de planeet zullen de radiobronnen zich immers beurtelings naar de waarnemer toe en van hem af bewegen, al zijn de hierbij optredende snelheden aanzienlijk kleiner dan deze die gepaard gaan met de beweging rond de zon. Uit nauwkeurige metingen van de frequentieverschuivingen die optreden als gevolg van de rotatie, kan de waarnemer zo ook de rotatiesnelheid achterhalen, en daarmee de diameter van de planeet (aannemend dat de zenders zich op het oppervlak bevinden), aangezien de rotatieperiode zelf reeds bekend is.

Nog veel meer kan de oplettende interstellaire waarnemer achterhalen door observeren en redeneren. De massa van de zon kan hij afleiden uit de gemeten lichtsterkte door middel van de bekende massa-lichtkrachtrelatie voor hoofdreekssterren. Door toepassing van de algemene gravitatiewet kan dan uit de gemeten omlooptijd (bekend uit de Doppler-verschuivingen van 365 dagen) de gemiddelde afstand berekend worden van de planeet tot de zon. Dit levert ook de baansnelheid op en, als deze kennis gecombineerd wordt met de uit de Doppler-metingen bekende snelheid in de kijkrichting, ook de oriëntatie van de planeetbaan. Uit nauwkeurige Doppler-metingen volgt tevens de excentriciteit (ellipsvormigheid) van de baan, en zo leert de waarnemer dat de planeet zich op een vrijwel cirkelvormige baan met een straal van 150 miljoen kilometer omheen de zon beweegt.

Uit de afstand tot de zon kan dan weer bij benadering de oppervlak-

te-temperatuur berekend worden. Zelfs het bestaan van de seizoenen kan hij afleiden uit de gevonden onderlinge stand van baanvlak en rotatie-as. Uiterst precieze Doppler-metingen moeten ook het bestaan aan het licht brengen van de maan die onze planeet omcirkelt. De omloop van de maan veroorzaakt immers een kleine schommelbeweging van de aarde zelf met een periode van 27.5 dagen, die terug te vinden moet zijn als een kleine frequentie-verschuiving in de radio-lijnen met die periode.

Ook over de chemische samenstelling van onze planeet kan hij iets te weten komen. Een zo kleine planeet (als blijkt uit de diameterbepaling), zo relatief dicht bij de zon, heeft enerzijds een geringe zwaartekracht en anderzijds een betrekkelijk hoge oppervlakte-temperatuur, waardoor lichte gassen als waterstof en helium, die de meest voorkomende elementen zijn in het heelal, betrekkelijk snel van de planeet moeten ontsnappen. Wat overblijft, zijn daarom naar alle waarschijnlijkheid hoofdzakelijk zwaardere elementen en hun verbindingen. Vooral silicaten en ijzer kunnen verwacht worden voor te komen omdat het materialen zijn, samengesteld uit de na waterstof en helium meest voorkomende elementen. Uit de afmetingen van de planeet en de soortelijke massa van de vermoedelijke bestanddelen, kan de totaal massa bepaald worden. Dat laat dan weer toe om de afstand van de maan tot de aarde te berekenen, steunend op de gevonden omlooptijd van de maan.

Het is verbazend hoe ver een scherpzinnige waarnemer op die manier kan doorgaan. Het voorgaande omvat niet meer dan betrekkelijk eenvoudige oefeningen, die een aardse astrofysicus zonder veel moeite zou oplossen. Naarmate de nauwkeurigheid van allerlei metingen wordt opgevoerd en de onderzoeker over voldoende wetenschappelijke kennis en verbeeldingskracht beschikt, kan het speurwerk echter nog heel wat verder gaan. Er lijkt geen grens aan wat in principe uit deze signalen afgeleid kan worden, zelfs zonder er de ware aard van te begrijpen of de boodschappen te ontcijferen die ze met zich voeren.

Onbewust en onbedoeld zijn wij hier op aarde dus bezig ons bestaan tot ver in de Melkweg bekend te maken. Niemand weet of zich waar dan ook buiten de aarde nog wezens bevinden die oog of oor hebben voor deze vreemde signalen, maar als binnen een straal van enkele tientallen lichtjaren iemand, zoals wij, de ruimte naspeurt en zich vragen stelt, dan kan onze aanwezigheid niet langer een geheim blijven.

Onderstel dat onze waarnemer in de interstellaire ruimte over voldoende technisch talent en intelligentie beschikt om ook de klanken en beelden die wij in deze radio-signalen opsluiten te registreren en te ontcijferen. Hij moet daartoe minstens de modulaties in de signalen opvangen en op de juiste wijze interpreteren. Als dat lukt, wordt hij waarlijk overstelpt met informatie. Nu komen ook de culturele, technische, politie-

ke, economische, militaire, geografische en sociale toestanden op aarde bloot te liggen. Het is de geduldige waarnemer dan mogelijk meer kennis te verwerven van wat zich op aarde afspeelt, dan heel wat aardbewoners op dit ogenblik.

Een gevoel van onbehagen kan bij dit alles niet meer helemaal onderdrukt worden. Met een schok beseffen we dat we over de daken uitschreeuwen wat misschien beter binnenskamers kon blijven. Sinds we met deze luidruchtige vorm van communicatie bezig zijn verspreiden zich de nieuwsberichten, reclame-spots, pathologische drama's en TV-quizzen met de lichtsnelheid over het melkwegstelsel. Geen beeld, geen woord kan teruggeroepen worden; het enige dat kan, is nieuwe berichten achteraan sturen.

Het aardse 'radio-tumult' is een recent verschijnsel. Ook dat moet voor de interstellaire waarnemer een veelzeggend feit zijn. Hij kan eruit besluiten dat wat zich thans op deze planeet afspeelt een snelle ontwikkeling doormaakt. Nauwelijks enkele decennia geleden was van de radiouitzendingen geen spoor te bekennen. Een vraag dringt zich daarbij op: hoelang zal het verschijnsel nog duren? Is hier een nieuw fenomeen met permanent karakter ontstaan, of zullen de uitzendingen even plots als ze zijn opgekomen ook weer verdwijnen? Een vraag die niet alleen voor de verre waarnemer van betekenis is.

Contact

De mogelijkheid bestaat, maar de kans is klein, dat het buitenaards wezen een teken van de aarde opvangt dat meer is dan een verdwaald TV-signaal of een militaire radarbundel. Soms worden door astronomen radargolven met grote antennes de ruimte ingestuurd om peilingen van het zonnestelsel te verrichten. Men laat deze krachtige radarsignalen op planeten kaatsen en vangt de echo's weer op. Uit de teruggekaatste signalen kan informatie afgeleid worden over onder meer reliëf en oppervlaktegesteldheid van de planeet. De signalen die hierbij worden aangewend zijn zo krachtig en geconcentreerd dat zij tot aan de andere kant van het melkwegstelsel, honderdduizend lichtjaar van hier, ontvangen moeten kunnen worden. Dergelijke uitzendingen vinden echter slechts heel sporadisch plaats, en bandbreedte en bundelwijdte zijn zo gering dat het buitengewoon onwaarschijnlijk is dat een dergelijke bundel ooit onderschept en geregistreerd kan worden.

Nog zeldzamer, maar ongetwijfeld het meest betekenisvol voor een buitenaardse waarnemer, zijn de enkele radioberichten die tot hiertoe bewust en met opzet de ruimte in werden gestuurd, bestemd voor even-

tuele buitenaardse belangstellenden. Een dergelijke poging werd voor het eerst ondernomen in november 1974. Toen werd met de Arecibo antenne een signaal met een frequentie van 2380 MHz (golflengte 12.6 centimer) en een duur van 169 seconden de ruimte ingestuurd, richting sterrenbeeld Hercules. In dit gebied bevindt zich een bolvormige sterrenhoop (M13), gelegen op een afstand van 24 000 lichtjaar, waarop de signalen gericht werden. De uitzending bevat informatie die zo opgevat en gecodeerd is dat aangenomen wordt dat ze door een redelijk intelligente waarnemer ontcijferd en begrepen kan worden. Het bericht bevat een opsomming van de getallen van 1 tot 10, de atoommassa's van de belangrijkste elementen die een rol spelen in organische moleculen (op aarde!), de structuur van een DNA molecule als chemische basis van het leven (alweer, op aarde), een schematische voorstelling van een menselijk figuur, en een beknopte plattegrond van het zonnestelsel. Al deze informatie werd in binaire code verpakt en moet dienen om de herkomst van het signaal — wijzelf — kenbaar te maken. Het zal uiteraard 24 000 jaren duren vooraleer de boodschap zijn bestemming in M13 bereikt, en een antwoord moet daarom voorlopig niet verwacht worden. Het bericht kan echter wel onderweg reeds onderschept worden en dan kan een kennisgeving van ontvangst misschien al onderweg zijn...

Dergelijke directe pogingen tot interstellair contact zijn sindsdien nog ondernomen, maar naar alle waarschijnlijkheid zijn ze van weinig betekenis. Afgezien van de vraag of buitenaardse ogen, oren of antennes bestaan om zo'n gebaar op te vangen, is de kans dat dit *kan* gebeuren zo goed als nul. De smalle bandbreedte van het signaal in het uitgebreide en onoverzichtelijke electromagnetische spectrum, de geringe bundelomvang, en het uiterst sporadisch karakter van dergelijke uitzendingen maken de kans dat ze ooit worden opgevangen vrijwel onbestaand. Van grotere betekenis is de weliswaar zwakkere, maar in frequentie, richting en tijd meer verspreide radio-emissie die onbedoeld van de aarde weglekt. Deze verraadt op de meest opvallende wijze onze aanwezigheid en legt iets van het ware gelaat van de aarde bloot.

Dit kleine, onaanzienlijke stofdeeltje van het melkwegstelsel heeft hierdoor opgehouden onbelangrijk te zijn. Het treedt uit de anonimiteit en schreeuwt zijn bestaan uit.

3

De grote stilte

Het antwoord van de ruimte op het rumoer van de aarde is stilte. Tenzij we de boodschap niet horen of niet begrijpen, is er niemand daarbuiten die iets te zeggen heeft. Is eenzaamheid de prijs die voor het leven betaald moet worden?

Is de aarde met haar rumoerige vracht de enige levendragende planeet in het heelal? A priori lijkt niets onwaarschijnlijker. Waarom zou de natuur wat ze tot stand gebracht heeft op deze planeet, alléén op deze planeet realiseren? Het feit dat buiten de aarde het hele zonnestelsel er doods en verlaten bij lijkt te liggen hoeft niet noodzakelijk te ontmoedigen. Het melkwegstelsel is zoveel groter en biedt veel meer mogelijkheden. Al weten we niet hoeveel planeten een gemiddelde ster bezit — en zelfs of planeten bij andere sterren in de regel wel voorkomen — naar alle waarschijnlijkheid is onze zon met haar schaar planeten geen uitzondering en moet het totaal aantal planeten in het melkwegstelsel vele honderden miljarden bedragen. Daarbuiten komen dan nog miljoenen andere melkwegstelsels voor... Onder een zo groot aantal beschikbare plaatsen moeten de gevallen talrijk zijn waar de omstandigheden vergelijkbaar zijn met die op aarde, of waar deze op een andere manier gunstig zijn voor het ontstaan en de ontwikkeling van dat merkwaardige verschijnsel dat we leven noemen.

Buitenaardse beschavingen

Het lijkt daarom redelijk aan te nemen dat leven — menselijk of anders — overvloedig in het heelal voorkomt. Dat is ook, zoals blijkt uit een overvloed van publicaties over het onderwerp, de opvatting van een grote meerderheid van astronomen en van al wie zich met het probleem heeft bezig gehouden. Er bestaat, zo kan men vaststellen, bijna een consensus over deze kwestie; algemeen is men de mening toegedaan dat leven in het

heelal een wijd verspreid verschijnsel is. Op elke planeet waar de temperatuur niet te hoog en niet te laag is, waar vloeibaar water of een ander geschikt chemisch medium voorkomt, waar misschien aan nog een aantal fysische en chemische voorwaarden voldaan is, en vooral ook, waar deze gunstige omstandigheden zich gedurende voldoende lange tijd handhaven (minstens enkele honderden miljoenen jaren), daar zal biologische activiteit zich ontwikkelen. Met het overgrote aanbod aan planeten moet op ongetwijfeld zeer veel plaatsen aan deze voorwaarden voldaan zijn. Leven zou dan ook een zeer verspreid verschijnsel zijn.

De meest bekende promotor van deze gedachte is Carl Sagan die in een aantal boeken en televisie-uitzendingen de kwestie van buitenaards leven en in het bijzonder van intelligent buitenaards leven aan de orde bracht. De opvattingen van Sagan en van talrijke van zijn collega's zijn voor een groot deel gebaseerd op de zogenaamde vergelijking van Drake. Die ziet eruit als volgt:

$$N = R\, f_p\, n_b\, f_l\, f_i\, L$$

Hierin stelt N het aantal intelligente beschavingen in de galaxie voor, R het aantal sterren dat per jaar gevormd wordt in de galaxie, f_p de fractie van de sterren die planeten bezit, n_b het gemiddeld aantal planeten in een planetenstelsel waarop zich biologische activiteit kan ontwikkelen en f_l de fractie daarvan waarop zich effectief leven ontwikkeld heeft, f_i de fractie van de levendragende planeten waarop het leven een graad van intelligentie bereikt die minstens vergelijkbaar is met die van de huidige aarde. L tenslotte stelt de gemiddelde levensduur van een intelligente beschaving voor.

Helaas is geen enkele van deze factoren zelfs maar bij benadering bekend. Misschien bestaat alleen voor R een enigszins betrouwbare schatting. Vermoed wordt dat het tempo van stervorming in ons melkwegstelsel ongeveer neerkomt op tien nieuwe sterren per jaar. Voor de rest moeten we ons tevreden stellen met gissingen. f_p ligt waarschijnlijk in de buurt van 1, want het lijkt redelijk dat verreweg de meeste sterren in het bezit zijn van planeten. Als een planeet te dicht bij haar zon staat, is de temperatuur er te hoog voor biologische processen, te ver er vandaan is de temperatuur echter weer te laag. In ons zonnestelsel blijkt slechts één planeet te genieten van de noodzakelijke milde temperatuur. Laten we aannemen dat dit typisch is en n_b gelijk stellen aan 1. Voor het produkt van f_l en f_i lijken Sagan en collega's geneigd een waarde van ongeveer 0.01 aan te nemen. Er bestaat, door gebrek aan ervaring, al evenmin een stevige basis voor een afschatting van L, maar misschien is tien miljoen jaar een redelijke waarde.

Met behulp van deze getallen vindt men voor N een waarde van één miljoen beschavingen in ons melkwegstelsel. Tengevolge van de onzekerheden kan dit aantal gemakkelijk tien of honderd maal te groot of te klein zijn geschat. De conclusie van de meeste onderzoekers is echter dat het aantal intelligenties in het heelal zeer groot moet zijn, waarschijnlijk miljoenen per melkwegstelsel.

In het licht van het volstrekt ontbreken van enig bewijs of rechtstreekse aanwijzing is het vrij algemeen aanvaard worden van een dergelijke opvatting echter een bedenkelijke toestand. Te weinig wordt door de verkondigers benadrukt dat deze opvatting geen wetenschappelijk standpunt is, maar eerder een akte van geloof.

Nog afgezien van de onzekerheden eigen aan de bepaling van de waarden van de factoren, lijkt het me moeilijk aan de vergelijking van Drake zelf enige waarde te hechten. Deze wijze van formulering van het probleem vloeit voort, denk ik, uit een fatale misvatting. Het is waarschijnlijk helemaal niet mogelijk het voorkomen van leven, of in het bijzonder intelligent leven, te berekenen aan de hand van een produkt van waarschijnlijkheden. Leven zou een onontkoombaarheid kunnen zijn, wat ook de fysische omstandigheden zijn. In dat geval zijn de factoren in de vergelijking van Drake niet eens relevant. Het zou aan de andere kant kunnen zijn dat leven meer het resultaat is van een toevalligheid dan van een combinatie van omstandigheden waaruit het noodzakelijk te voorschijn moet komen. Evenmin kan a priori worden uitgesloten dat de natuur op doelgerichte wijze evolueert tot leven zich manifesteert, wat ook de omstandigheden zijn. De aard van deze omstandigheden zou dan slechts een rol spelen in zoverre zij de karakteristieken van de uiteindelijke levensvormen helpen bepalen. In het licht van het bewustzijn en van de actieve intelligentie die het aardse leven bezit, waarbij althans één van de levensvormen hier zich inderdaad op eigen wijze ontwikkelt en de omstandigheden naar z'n hand zet, kan deze mogelijkheid allerminst op principiële gronden worden afgewezen. Voor de vergelijking van Drake is dat echter wel fataal.

De opvatting dat leven een wijd verspreid fenomeen is in het heelal, is vooral gebaseerd op het gevoel dat het tegendeel absurd zou zijn. In een heelal met zoveel sterren en planeten kan de aarde niet de enige bewoonde wereld zijn. Alles berust daarbij echter op gevoel. Niet op kennis. Niet op een grondige interpretatie van het verschijnsel leven. Integendeel, het gevoel is blijkbaar zo sterk, dat geduld wordt dat het ingaat tegen wat aan concrete kennis in verband met het probleem toch bestaat.

Nog voor we ons hier wèl dieper over de kwestie van de aard van leven zullen buigen, wil ik in dit en volgend hoofdstuk dit 'veelwerelden' gevoel confronteren met een aantal overwegingen en waarne-

mingsgegevens. Waarnemingen met betrekking tot het probleem van het buitenaards leven bestaan wel degelijk, zowel wat de toestand binnen het zonnestelsel, als wat een veel wijdere omgeving binnen het melkwegstelsel betreft. De verlaten en levenloze indruk die de overige planeten van het zonnestelsel maken, kwam reeds eerder ter sprake; we komen er uitvoeriger op terug in het volgende hoofdstuk. De situatie binnen het melkwegstelsel is tot op zekere hoogte ook te peilen, althans wat betreft het voorkomen of ontbreken van hogere levensvormen. Dit hoeft niet te verbazen in het licht van de in het vorige hoofdstuk besproken opvallende waarneembaarheid van de enige hogere levensvorm die we kennen. Laat ons daarom deze Melkweg nu nader bekijken. Wat geeft zij prijs over wat er leeft binnen haar immense schoot?

Waar is iedereen?

Aards leven is door zijn radio-uitstralingen waarneembaar (met behulp van eveneens aardse technologie) over interstellaire afstanden. Op overeenkomstige wijze zouden de signalen van andere galactische beschavingen — als ze bestaan — op aarde opgevangen moeten kunnen worden. Eventuele meer gevorderde extraterrestrische technologieën, met krachtiger en daarom gemakkelijker te ontvangen communicaties, moeten zelfs opvallend waarneembaar zijn. Aan de hemel zouden daarom de tekenen van extraterrestrische culturen zichtbaar moeten zijn. We weten niet in welke vorm of met welke intensiteit zij zich presenteren, maar a priori kan een opvallende manifestatie verwacht worden, een overduidelijke blijk van aanwezigheid, onmiskenbaar te onderscheiden van natuurlijke verschijnselen.

Er kan hiertegen geopperd worden dat de aardse situatie niet typisch hoeft te zijn voor buitenaardse levensvormen. Andere, voor ons minder of niet herkenbare, vormen van communicatie zouden kunnen voorkomen. Zeker is ook dat op aarde de technologische fase waarin deze opmerkelijke waarneembaarheid zich voordoet nog zeer jong is, en misschien van korte duur. Als op andere planeten de periode van radio-communicatie eveneens slechts een kortstondig fenomeen is, kan zij daardoor gemakkelijk aan de aandacht ontsnappen. Het is dan immers weinig waarschijnlijk dat zich juist op dit ogenblik een beschaving in de geschikte fase van haar ontwikkeling bevindt voor detectie door ons.

Hiertegenover moet dan echter weer opgemerkt worden dat, als leven in het melkwegstelsel, zoals de sterren en planeten zelf, miljoenvoudig voorkomt, er ook miljoenen verschillende variëteiten en ontwikkelingsstadia gelijktijdig aanwezig zullen zijn. Leven zoals we het kennen op

aarde, dat ook nog in eenzelfde graad van ontwikkeling voorkomt, is ongetwijfeld een zeer specifieke toestand van relatief korte duur en daarom in verhouding zeldzaam. Onder de onderstelling van een wijd verspreid voorkomen van leven in het algemeen, zou ook deze specifieke vorm echter nog een groot aantal keren gelijktijdig kunnen optreden. Leven dat op een hogere trap van ontwikkeling staat dan het huidige aardse, zou dan in het algemeen weer veel talrijker moeten voorkomen (wat vanzelfsprekend ook geldt voor minder ontwikkeld leven). Het is ook weinig aannemelijk dat dergelijke verder geëvolueerde levensvormen zich minder frappant zouden manifesteren dan het huidige leven op aarde — verschillend waarschijnlijk wel, maar niet noodzakelijk minder opvallend. Evenmin als de aanwezigheid van de mens (of elke andere dominerende levensvorm in de geologische geschiedenis) beperkt bleef tot een schuchter fenomeen op aarde dat een verborgen en teruggetrokken bestaan leidt, is het te verwachten dat gevorderde buitenaardse beschavingen cryptische wezens zouden zijn die zich wegstoppen en hun bestaan niet willen verraden.

We zouden ons dus moeten verwachten aan opvallende manifestaties van hoog ontwikkelde technologie en cultuur aan het firmament. Of de uitstralingen van dergelijke levensvormen radiogolven zijn, of infrarode straling of licht of een andere vorm van straling, is vooraf niet uit te maken maar is ook minder belangrijk. Met het hedendaags astronomisch instrumentarium kan straling in elk van deze frequentiegebieden bestudeerd worden.

Niet enkel de emissies die voor telecommunicaties gebruikt worden, moeten het bestaan van deze extraterrestrische beschavingen verraden, ook de onvermijdelijke 'afval-straling' die geproduceerd wordt bij de activiteiten van dergelijke levensvormen, zou bij ver gevorderde beschavingen een opvallend waarneembaar verschijnsel kunnen vormen. Freeman Dyson heeft gespeculeerd dat de energie-behoefte van hoogontwikkelde levensvormen zo groot kan worden dat deze wezens de stralingsenergie van 'hun' ster volledig dienen te benutten. Daartoe zouden ze een grote sfeer omheen deze ster kunnen bouwen die geen straling nutteloos laat ontsnappen. Een waarnemer op grote afstand van een dergelijke artificieel ingekapselde ster zou de ster zelf daarom niet meer kunnen zien, maar wel de infrarode straling die wordt uitgezonden aan de buitenkant van de sfeer, en die de afval-warmte is van de activiteiten die zich erbinnen afspelen.

Groei en expansie zijn een essentieel kenmerk van het bestaande leven op aarde, en naar kan worden aangenomen, van elke levensvorm die succesvol is. Alleen door verspreiding over een toenemende ruimte kan de verscheidenheid aan vormen en gedragingen bekomen worden

die een evolutie naar groeiende complexiteit toelaat. Gevorderde levensvormen kunnen daarom verwacht worden uit te zwermen over het melkwegstelsel, nadat ze eerst reeds hun planeet van oorsprong, en dan hun zonnestelsel hadden ingepalmd. Zoals de mens thans signalen, machines en leden van de eigen soort de ruimte instuurt, zouden analoge initiatieven genomen kunnen zijn door extraterrestrische beschavingen die eerder dit peil van ontwikkeling hebben doorgemaakt. Met voldoende tijd ter beschikking, is er geen grens aan het terrein dat een expanderende biologische soort kan bestrijken. Is het dan niet te verwachten dat onze aarde veel eerder reeds binnen het territorium van een uitzwermende galactische beschaving gekomen moet zijn? De leden ervan, of hun artefacten, moeten zich dan hier onder ons bevinden. Niet slechts aan de hemel, maar ook op aarde zelf zou daarom het bestaan van buitenaardse beschavingen moeten blijken.

De confrontatie tussen deze galopperende gedachtengang en de bekende werkelijkheid dreigt hoe langer hoe meer mis te lopen. Er bestaat onvoldoende basis om geloof te hechten aan UFO-verhalen of aan speculaties over buitenaardse astronauten die in historische tijden de aarde bezocht zouden hebben. Er is dan ook geen gegronde reden om te twijfelen aan het feit dat het leven op aarde van buiten uit ongemoeid gelaten wordt en zich volledig geïsoleerd ontwikkelt. Van belangstelling, bezoek of bemoeienissen van buitenaardse oorsprong is geen spoor te bekennen.

En wat zegt de hemel? Zijn tussen de sterren van de Melkweg tekenen te vinden van buitenaardse levensvormen of superieure beschavingen? Op het eerste gezicht is er weinig dat daarop wijst. Wat de sterrenkunde over het melkwegstelsel aan het licht heeft gebracht, lijkt goeddeels door bekende natuurwetten verklaarbaar. Sterren, interstellaire nevels en alle andere ingrediënten van het melkwegstelsel gedragen zich blijkbaar op berekenbare manier en vertonen geen eigenschappen of gedragingen die door het ingrijpen van een galactische intelligentie verklaard zouden moeten worden. Er is geen reden om eraan te twijfelen dat wat er thans nog aan onbegrepen galactische verschijnselen bestaat, toegeschreven moet worden aan onze onvoldoende kennis van deze fenomenen, en dat de problemen opgeruimd kunnen worden door toepassing van de gewone natuurwetten zodra meer informatie over deze verschijnselen of een beter begrip van deze wetten zelf beschikbaar komt. Biologische of verstandelijke processen lijken daartoe niet nodig. Ook de soms complexe organische moleculen, die door radio-waarnemingen in de interstellaire ruimte werden ontdekt, vragen niet om een biologische oorsprong. Gewone chemische interacties tussen de gassen en stofdeeltjes in de ruimte kunnen de vorming van deze moleculen verklaren.

'Waar is iedereen?' vroeg de Italiaanse natuurkundige Enrico Fermi

zich reeds in 1943 af, toen hij zich realiseerde dat buitenaardse beschavingen zich aan de hemel zouden moeten manifesteren maar dat niet veel daarvan blijkt.

Radio-zoektochten

Het is voorgevallen dat signalen werden opgevangen van zo vreemd gedrag dat aanvankelijk geen natuurlijke verklaring denkbaar leek. In 1967 werd door Jocelyn Bell van het Cavendish Laboratory te Cambridge in Groot-Brittannië een flikkerende radiobron aan de hemel ontdekt. De uitzendingen van het object bestonden uit korte pulsen, die elkaar zeer regelmatig opvolgden met een tussentijd van 1.337 seconden. Eerst vermoedde men dat het verschijnsel slechts een gevolg was van storing door lokale radiozenders. Uit nauwkeurig onderzoek bleek echter dat dit uitgesloten is. De 'pulsar', zoals het object werd genoemd, bezat een vaste plaats aan de hemel. Enkele weken later werden nog drie van dergelijke pulsars gevonden. De astronomen van Cambridge, onder leiding van Antony Hewish, braken zich het hoofd voor een verklaring voor het fenomeen. Een kosmische radiobron die op zeer regelmatige wijze aan- en uitflitst, met een tijdsnauwkeurigheid van beter dan één op honderdmiljoen, leek op het eerste gezicht niet verklaarbaar met behulp van bekende natuurlijke processen. Was dit het langverwachte signaal van een buitenaardse beschaving? Zijn deze pulsars misschien interstellaire navigatiebakens, galactische tijdszenders, radio-zoeklichten, of wat voor technische wonderen ook?

Het heeft echter niet lang geduurd vooraleer de Cambridge astronomen de ware aard van de pulsars vermoedden. In een publikatie in het tijdschrift *Nature* bood Hewish de verklaring: pulsars zijn uiterst compacte restanten van oude, bijna uitgebluste sterren. Zij wentelen als een tol razendsnel om hun as en sturen bundels radiostraling de ruimte in. Door de rotatie zwiepen deze bundels in het rond en telkens zij daarbij de aarde treffen, registreert men een radio-puls. Fascinerende objecten zijn deze gierende, vergane sterren alleszins, maar met een buitenaardse intelligentie hebben zij niets te maken.

Aangezien het duidelijk is dat geen andere technologische levensvormen zich opvallend aan de hemel manifesteren, overheerst thans de opvatting dat een meer gedetailleerd en doelgericht onderzoek nodig is. In 1959 publiceerden Giuseppe Cocconi en Philip Morrison een strategie die daartoe gevolgd zou kunnen worden. Zij stelden voor radiowaarnemingen te verrichten van een aantal betrekkelijk nabij gelegen sterren bij een golflengte van 21 centimeter (frequentie 1420 MHz), die

overeenkomt met de straling van neutraal waterstof. Deze frequentie werd gekozen op basis van de overweging dat waterstof het meest voorkomend element is in het heelal en daardoor als een soort universele standaard opgevat kan worden. Indien de 'anderen' zouden trachten zich met ons in verbinding te stellen door middel van op ons gerichte radiouitzendingen, zouden zij zich voor het probleem geplaatst zien een frequentie te kiezen. Aangezien het niet mogelijk is voorafgaand een afspraak te maken met ons, weten zij niet op welke frequentie wij afstemmen. Langs onze kant weten wij niet bij welke frequentie zij uitzenden. Cocconi en Morrison redeneerden, dat vanwege het ongewisse aan beide kanten, beide partijen gebruik dienen te maken van een frequentie die zich om zuiver kosmische of natuurkundige redenen opdringt. Elke andere keuze zou willekeurig lijken en de kans dat beide partijen elkaar op eenzelfde frequentie ontmoeten, tot vrijwel nul herleiden. Een voor de hand liggende keuze, vinden Cocconi en Morrison, is de natuurlijke frequentie van het waterstof-atoom, omdat elke intelligentie in het heelal op de hoogte moet zijn van de bijzondere kosmische betekenis van waterstof.

Beide auteurs stelden verder voor als doelwit een eerder onopvallende ster te kiezen van een type zoals de zon, een enkelvoudige ster, niet te groot, niet te klein, niet te jong, niet te oud. Een dergelijke ster zou de meeste kans bieden ook planeten te bezitten zoals de zon, planeten waarvan sommige dan wellicht ook de meeste gelijkenis vertonen met de aarde, en waarop wellicht levende wezens voorkomen die ook gelijken op die op aarde. Het artikel van Cocconi en Morrison hield in wezen een pleidooi voor de inzet van middelen die gebaseerd zijn op evidenties, of althans wat de auteurs als evidenties ervoeren. In plaats van te speuren naar uitingen van wie weet wat voor wilde en onvoorstelbare levensvormen, stelden zij voor aan de hemel te zoeken naar het spiegelbeeld van onszelf.

Na deze suggestie duurde het niet lang vooraleer de eerste SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence) projecten daadwerkelijk van de grond kwamen (althans op aarde). In 1960 richtte Frank Drake (dezelfde als van de vergelijking), in het kader van wat 'project Ozma' werd genoemd, de grote radiotelescoop van het National Radio Astronomy Observatory te Greenbank in de staat West Virginia, op twee nabije sterren, tau Ceti en epsilon Eridani. Beide sterren staan op een afstand van ongeveer 11 lichtjaar van hier. Allebei zijn ze iets minder lichtsterk dan de zon, en van een vergelijkbaar spectraaltype. Alles bij elkaar werden zij gedurende vierhonderd uur in de gaten gehouden, op de voorgestelde frequentie van 1420 MHz.

Het resultaat was negatief. Geen enkel verdacht signaal werd opge-

vangen, geen boodschap, geen teken dat opgevat kon worden als een poging de aandacht te trekken. Het dient gezegd dat project Ozma natuurlijk zeer bescheiden van omvang en betekenis bleef. Slechts twee sterren werden geobserveerd gedurende een zeer beperkte tijdsduur en bij slechts één enkele frequentie. Enig algemeen besluit uit een zo beperkt experiment kan niet getrokken worden. Het melkwegstelsel is honderdduizend lichtjaar groot en bevat honderd miljard sterren. Een zeer groot aantal andere frequentiebanden wacht op onderzoek. Een lange geduldige zoektocht, met de inzet van veel meer tijd en middelen dan mogelijk was bij het Ozma-project, leek alleen maar meer noodzakelijk geworden.

Na Drake hebben talrijke andere onderzoekers zich aan het werk gezet. Projecten werden op touw gezet voor langduriger warnemingen op meer frequenties van een groter aantal sterren. Meestal waren nabije sterren het doelwit, maar ook op verderaf gelegen doelen, zoals sterrenhopen, het galactisch centrum, de galactische pool werden de antennes gericht. Zelfs op andere melkwegstelsels werd afgestemd. Waarom zou een ver geëvolueerde beschaving niet haar hele sterrenstelsel domineren en organiseren, zoals wij thans onze planeet? De Russische astrofysicus Kardashev concentreerde zich vooral op exotische objecten als quasars en Seyfert galaxieën, waar hij hoopte tekenen te vinden van een intelligente beheersing van de gigantische galactische energiebronnen. Vooral Amerikanen en Russen, maar ook Australiërs, Canadezen, Japanners, Fransen, Nederlanders en Duitsers zetten zich aan het werk, op zoek naar vreemde radiomodulaties, spectrale kenmerken, pulsen of andere tijdsvariaties die niet op een natuurlijke manier verklaard kunnen worden.

Er werd ook voorgesteld te luisteren op andere frequenties dan alleen die van de 21 centimeter waterstoflijn. In het bijzonder werd gewezen op de betekenis van de band tussen 1420 en 1662 MHz. De eerste frequentie correspondeert met de genoemde 21 centimeter straling, uitgezonden door waterstofatomen (H), de tweede wordt uitgezonden door hydroxylradicalen (OH), die eveneens overvloedig voorkomen in de interstellaire ruimte. H en OH vormen chemisch samen water (H_2O), en daardoor krijgen deze frequenties een symbolische betekenis die andere intelligenties niet zal ontgaan, althans niet indien zij chemisch functioneren op een wijze die vergelijkbaar is met onze biochemie, waarin water een essentiële rol speelt. Deze frequentieband wordt het 'water-gat' genoemd, want ze valt binnen een 'gat' in het radiospectrum, een gebied waar de galactische achtergrondstraling zeer zwak is. Hierin ligt een bijkomend voordeel voor communicatie op deze band binnen het melkwegstelsel. Volgens de redenering van sommigen zouden eventuele extraterrestrische intelligenties daarom bij voorkeur gebruik maken van dit gebied indien zij radiocontact zouden willen leggen. Niet alleen treedt hierdoor minder ruis en

absorptie op dan bij frequenties die merkelijk hoger of lager liggen, maar wellicht geeft ook de symbolische betekenis van het 'water-gat' een universele betekenis aan dit frequentiegebied.

Ook de Amerikaanse ruimtevaartorganisatie NASA begon een SETI programma, gezamenlijk uitgevoerd door het Ames Research Center en het Jet Propulsion Laboratory. Het NASA programma concentreerde zich op een speurtocht in het microgolvengebied, met behulp van gesofisticeerde radiotelescopen en spectraalanalyse-technieken. Door gebrek aan fondsen, moest het project echter voortijdig worden stopgezet. Desondanks ondervindt de SETI-gedachte steeds meer bijval in wetenschappelijke kringen van zeer uiteenlopende disciplines en nationaliteiten. Internationale coördinatie en samenwerking kwam tot stand, wat vooral bleek op een aantal wetenschappelijke conferenties, die speciaal over dit thema werden gehouden. De Internationale Astronomische Unie organiseerde in 1984 een symposium te Boston, gewijd aan SETI. Onder initiatief van Carl Sagan van de Planetary Society werd in 1983 een petitie opgesteld, waarin steun gevraagd werd voor actieve SETI. Het verzoekschrift werd ondertekend door meer dan zeventig wetenschapsmensen, waaronder acht Nobel laureaten, uit veertien verschillende landen.

Een groots opgevat en thans nog lopend project werd uitgevoerd door Paul Horowitz van de Harvard University. Sinds 1982 verricht Horowitz waarnemingen met behulp van een multi-kanaalanalysator die toelaat tegelijk af te stemmen op een kwart miljoen frequenties in de buurt van een gekozen basisfrequentie. Met deze moderne ontvangers kunnen in één minuut meer signalen worden opgevangen en geanalyseerd dan gedurende honderdduizend jaar met een radiotelescoop van het type gebruikt bij project Ozma in 1960. In een eerste testfase werd de analysator aangesloten op de 300 meter radiotelescoop van Arecibo. 250 nabijgelegen sterren werden met deze telescoop dan waargenomen, het meest doorgedreven (maar niet meest uitgebreide) SETI programma ooit uitgevoerd.

Ook nu werd weer, zoals bij alle eerdere pogingen, niets vastgesteld dat wijst op enige intelligente activiteit in de kosmos. Hierdoor niet ontmoedigd, koppelde Horowitz zijn toestel aan de 25 meter radiotelescoop van Oak Ridge in Massachussetts, en startte hiermee het 'Sentinel' project, een systematische speurtocht van de ganse hemel, waarbij tegelijkertijd afgestemd wordt op 128 000 frequenties, gecentreerd rond een frequentie in het 'water-gat'. Het Sentinel project wordt moreel en finanieel gesteund door de invloedrijke Planetary Society. Het is op dit ogenblik nog steeds aan de gang. Het aantal tegelijk beluisterbare frequenties werd recent zelfs tot 8 miljoen opgevoerd.

Het resultaat van al deze inspanningen blijft nog steeds negatief: geen vreemde codes, abnormale signalen, onnatuurlijke modulaties,

niets. De hemel zwijgt in alle talen. Wellicht is het tot hiertoe verrichte zoekwerk nog onvoldoende. Misschien moet er vele jaren, of eeuwen, gespeurd worden in de onafzienbare Melkweg bij veel meer frequenties en met veel gevoeliger instrumenten, vooraleer en conclusie getrokken mag worden. Tot zolang moet ongetwijfeld de wijsheid gelden dat afwezigheid van aanwijzingen, nog niet een aanwijzing voor afwezigheid is.

Toch kan een vermoeden al lang niet meer helemaal onderdrukt worden. Eigenlijk was een overduidelijke, manifeste blijk van aanwezigheid verwacht. Die is er niet. Dan werd een zoektocht op touw gezet naar minder uitbundige uitingen van buitenaardse intelligentie, naar levensvormen die zich, zoals de aarde, wel kenbaar maken maar zonder daarbij een groot deel van de ruimte op stelten te zetten. Ook nu blijft het zoeken vruchteloos. Ik geef toe, het is te vroeg voor een definitieve uitspraak, het onderzoek moet worden voortgezet. Nog altijd wordt enkel geluisterd naar signalen die met opzet naar ons zouden worden gestuurd. Wellicht is dat te veel gevraagd. Misschien is het nodig signalen op te vangen die onbedoeld ontsnappen. Misschien geeft dat nieuwe kansen.

Maar een voorgevoel kan ik niet meer onderdrukken. 'Waar is iedereen?' De vraag klinkt luider naarmate men meer zoekt. Waarom die stilte? Zijn wij alleen? Of zijn de anderen zo anders dat we niets herkennen, niets begrijpen, niets zien?

4

Het trieste der planeten

Het zonnestelsel is een bonte verzameling planeten, elk met een eigen gezicht en met eigen beloften. De verwachting er leven aan te treffen was ooit hoog gespannen maar nu blijkt dat ze geen van alle bereid zijn de belofte in te lossen. De aarde blijft alleen.

Er komt geen duidelijk antwoord van de Melkweg op de vragen van de aarde. Ik vermoed dat het ook onredelijk was dat te verwachten. Wat zich in de immense galactische ruimte afspeelt, is wellicht zo vreemd of onverwacht dat het ons totaal ontgaat, hoe gespannen we ook kijken. J.B. Haldane zal wel gelijk gehad hebben toen hij in 1927 schreef: 'The universe is not only queerer than we suppose, but queerer than we can suppose'. Het heelal is anders dan de aarde, anders dan onze gedachten. Als in de ruimte voorbij het zonnestelsel leven voorkomt, en tussen de sterren gedachten worden uitgewisseld, dringt misschien niets daarvan tot ons bewustzijn door. Net zoals de vogel de telefoongesprekken niet hoort die door de draad flitsen van waarop hij de omgeving gadeslaat.

Laten we naar huis keren, naar het domein van de zon, waar de dingen zich op eenzelfde schaal afspelen als op de vertrouwde aarde. Hier, op de planeten en manen van het zonnestelsel, dringt de vraag naar ander leven zich spontaan op, want hier is er zoveel dat aan de eigen aarde herinnert. Hier kan bovendien een antwoord verwacht worden in alle duidelijkheid.

Maar heeft het nog wel zin? Is de vraag naar leven op deze hemellichamen niet reeds beantwoord door de bekende omstandigheden die er heersen? De doodsheid die elk der planeten uitstraalt ligt in zo schril contrast met onze vriendelijke aarde, dat het uitgesloten lijkt in deze troosteloze oorden ooit leven aan te treffen. De vraag naar het voorkomen van ontwikkelde beschavingen hoeft in elk geval niet meer gesteld te worden want levensvormen vergelijkbaar met deze thans op aarde zouden zich reeds veel eerder op opvallende wijze aan ons vertoond hebben.

Is er misschien nog hoop voor een of andere vorm van verdoken,

primitief of sluimerend leven, leven dat zich door z'n onopvallend uitzicht of schuchtere aard nog niet heeft laten ontdekken met de huidige middelen? Deze mogelijkheid werd in het verleden door een groot aantal onderzoekers ernstig genomen en spreekt ook nu nog tot de verbeelding. Als door iedereen nu wel toegegeven wordt dat opvallend of ver geëvolueerde levensvormen buiten de aarde op geen der planeten van het zonnestelsel voorkomen (ook al werd zelfs daarover in een recent verleden misschien nog anders gedacht), dan kan de mogelijkheid misschien toch niet uitgesloten worden dat minder ontwikkelde levensvormen, of restanten van uitgestorven leven kunnen worden aangetroffen.

Het is een oud geloof en het is hardnekkig. Het klinkt bovendien niet onredelijk. Wat zijn de aanwijzingen?

Sinds de uitvinding van de telescoop, vierhonderd jaar geleden, zijn de planeten van etherische lichtpunten zonder substantie, buurwerelden geworden van tastbaar materiaal, in vormen en dimensies vergelijkbaar met de aarde. Dat was een eerste grote stap op weg naar de aanvaarding van het idee van buitenaards leven. Bergen, kraters, wolken en winden waren niet meer exclusieve elementen van de aarde maar werden ook op deze hemellichamen aangetroffen. Gold hetzelfde misschien ook voor planten, dieren en mensen?

De planeten gingen in hun nieuwe hoedanigheid sterker tot de verbeelding spreken dan voorheen en werden een onderwerp van wetenschappelijk onderzoek. Tegelijk met een groeiende wetenschappelijke kennis vormden zich ideeën over hun bewoonbaarheid en over eventuele exotische levensvormen die ze zouden kunnen dragen. Moderne astronomie en ruimte-onderzoek confronteerden deze denkbeelden met harde feiten, in sommige gevallen ter plaatse vastgesteld. Daarmee werd een volgende stap gezet, niet minder revolutionair dan de eerste. Doorslaggevend in vele gevallen. Nooit meer zouden de planeten er uitzien als voordien.

Ik vrees eigenlijk dat het onderzoek naar leven binnen het zonnestelsel, zo kort nadat het pas goed van start ging, reeds afgelopen is. Het is waar dat de verwachtingen niet lang geleden nog hoog gespannen waren maar er is in weinig tijd veel gebeurd. In drie gevallen werd reeds uitsluitsel bekomen. Onderzoek naar biologische activiteit kon ter plaatse worden verricht op de maan en de planeet Mars. Op Venus bleek het overbodig.

We zullen de situatie binnen het zonnestelsel en de wijze waarop die aan het licht kwam, in dit hoofdstuk kort bespreken.

Met haar witte wolkendek is Venus een planeet met een vriendelijk gelaat. De sluier waarachter ze zich verbergt, ontneemt de waarnemer de mogelijkheid voor een vlotte kennismaking maar ondanks dat straalt Venus vertrouwen uit. Ze vertoont veel gelijkenis met de aarde. Venus is in het bezit van een atmosfeer. Ze is ook bijna even groot en zwaar als de aarde zodat haar gemiddeld soortelijk gewicht ongeveer gelijk is aan dat van onze planeet. Hieruit volgt dat ook de globale chemische samenstelling van Venus en aarde ongeveer dezelfde moeten zijn. Venus wentelt bovendien in een baan om de zon die niet veel van die van de aardbaan afwijkt, enkel de gemiddelde afstand tot de zon is wat minder, ruim 70 procent van die van de aarde tot de zon, maar ook dat lijkt geen essentieel verschil.

Venus lijkt in alle opzichten een zuster-planeet van de aarde, de meest evidente plaats, ongetwijfeld, om leven aan te treffen.

De permanente bewolking zorgt er nochtans voor dat vanop aarde het oppervlak nooit rechtstreeks waargenomen kan worden. Daardoor is het dat tot omstreeks 1960, van reliëf en bodemgesteldheid zo goed als niets bekend was. Zelfs de duur van een dag op de planeet kon niet bepaald worden. Een egaal wit schijfje is het enige wat Venus door een telescoop van zich laat zien. De merkwaardige toestand deed zich daardoor voor, dat deze meest nabijgelegen planeet lang één der minst bekende bleef. Toch was het vertrouwen van de astronomen lange tijd groot dat Venus een tweede aarde was: 'Il ne manque à Vénus qu'un satellite pour ressembler tout à fait au monde que nous habitons', schreef Flammarion in 1884 in zijn beroemde planetenbeschrijving 'Les Terres du Ciel'.

Bij gebrek aan voldoende bekende feiten was Venus in het verleden meer het voorwerp van speculatie en fantasie dan van wetenschappelijke discussie. Omdat zij dichter bij de zon staat dan de aarde lag het wel voor de hand dat het er warmer moet zijn. Er kon daarom aangenomen worden dat onder het dikke wolkendek een tropisch of subtropisch klimaat zou heersen. De overvloedige bewolking suggereerde de aanwezigheid van uitgestrekte oceanen, die dampend op de bodem van de planeet liggen. In de zwoele atmosfeer zou het overvloedig regenen en op het vasteland vormden zich daardoor moerassen en regenwouden, redeneerde men. Planten en dieren dienen in deze tropische wouden te vechten voor hun bestaan.

De schaarse gegevens, aangevuld met een flinke dosis verbeelding, leverden het beeld op van een wereld van water en land, jong en dikbegroeid ongeveer zoals de aarde er moet hebben uitgezien in het Carboon-

tijdperk. 'Notre jeune sœur', noemde Flammarion Venus teder in zijn 'Les Terres du Ciel'.

De Zweedse astronoom Svante Arrhenius beschreef in 1918, uitgaande van zijn opvattingen over het ontstaan en de verdere evolutie van planeten, hoe Venus, en in het bijzonder het leven op deze planeet, er volgens hem moesten uitzien. Hij becijferde de gemiddelde temperatuur er op 47° C, en de vochtigheid ongeveer zes maal groter dan de gemiddelde waarde op aarde. De atmosfeer zou tot op een hoogte van 5 kilometer ongeveer evenveel waterdamp bevatten als de hoeveelheid water die op heel het aardoppervlak ligt. 'Alles op Venus druipt van het nat' schreef Arrhenius. Bij die temperatuur en vochtigheid moet een weelderige plantengroei gedijen, maar het uniforme klimaat zouden aanpassing aan veranderende uitwendige omstandigheden overbodig maken, zodat er waarschijnlijk weinig differentiatie in de begroeiing is. Vermoedelijk komen slechts weinig verschillende soorten organismen voor op Venus, en waarschijnlijk zijn ze allemaal plantaardig. Door de hoge temperatuur is de levensduur van een organisme kort, en vergaat het snel na het afsterven. Volgens Arrhenius zou de temperatuur aan de polen wat lager zijn, 10° C ongeveer, en zouden op deze plaats de hoogst ontwikkelde levensvormen voorkomen.

Voor vele astronomen in de negentiende en eerste helft van de twintigste eeuw leek Venus een planeet als een ver tropisch eiland, blakend in het zonnelicht, met weelderige fauna en flora. Tennyson droomde ervan:

> Venus, near her, smiling downwards at this earthier earth of ours
> Closer on the sun, perhaps a world of never-fading flowers.

Flammarion was wel overtuigd van het bestaan van intelligente Venusbewoners, maar hij was niet gerust in de invloed van het klimaat op hun geestesgesteldheid. 'De quelle nature sont les habitants de Vénus?... Passent-ils leur vie dans les plaisirs... ou bien sont-ils tellement tourmentés par les intempéries de leurs saisons qu'ils n'aient aucune sensation délicate et ne soient d'aucune attention scientifique ou artistique?' (Flammarion, Astronomie Populaire, 1922).

Het beeld van Venus als oceaanwereld werd ontroerend geschilderd door C.S. Lewis in zijn verhaal Perelandra (1943), waarschijnlijk het lieflijkste proza ooit over een planeet geschreven. Onafzienbaar zijn de watervlakten op Perelandra, met emeraldgroene golven waarop het schuim goudgeel blinkt in het zonnelicht. Verspreid liggen veelkleurige eilanden van drijvende vegetatie. Een Hof van Eden, waar zich de mythe van Adam en Eva opnieuw kon afspelen. Een andere Venus, met wouden van eeuwig neer-

striemende regen, is onvergetelijk beschreven door Ray Bradbury en Paul Anderson.

Hoewel Mars altijd meer populair is geweest als decor voor science-fiction romans, genoot Venus het voordeel van haar mysterieuze wolken, waaronder zich de meest wonderlijke taferelen konden afspelen. Over de zanderige Mars hing steeds de dreiging van een droog en koud klimaat, waarin niet meer te beleven valt dan in een dorre woestijn.

Maar het sprookje bleef niet duren. Spectroscopische onderzoekingen slaagden er niet in de aanwezigheid van waterdamp vast te stellen in het gedeelte van de atmosfeer boven de wolken. Ook stikstof en zuurstof werden niet gevonden; wel koolstofdioxyde (CO_2). Radio-astronomische waarnemingen rekenden definitief af met het idyllische beeld dat van Venus was gevormd. In 1958 stelde een groep astronomen op het U.S. Naval Research Laboratory, onder leiding van C.H. Mayer, vast dat een abnormaal sterke radiostraling van de planeet afkomstig is. Als deze straling een thermische oorsprong heeft en afkomstig is van het oppervlak — en daar leek het op — zou dit er op wijzen dat Venus zeer heet is, veel heter dan iemand ooit had voorzien, een temperatuur aan het oppervlak van minstens 300° C!

Sinds 1964 kan door radarexperimenten voor het eerst ook de rotatieperiode gemeten worden. De planeet bleek niet alleen uiterst traag omheen haar as te wentelen, maar ook in tegengestelde zin. Stilaan ontpopte Venus zich als een planeet met een eigen karakter, anders dan de aarde, anders dan verwacht.

Schokkender nog was het nieuws dat door ruimtetuigen naar de aarde werd geseind. Een reeks Russische Venera ruimtetuigen en Amerikaanse Mariner en Pioneer toestellen zijn naar de planeet gestuurd. De eerste afdaling in de Venus-atmosfeer gebeurde door Venera 4 in oktober 1967. Vele andere tuigen zijn nadien gevolgd. Tijdens hun afdaling hebben instrumenten aan boord onder meer temperatuur, druk en chemische samenstelling gemeten. Bevestigd werd daardoor wat al vermoed werd, dat de lucht op Venus vrijwel volledig uit koolstofdioxyde bestaat (op aarde komt dit gas slechts voor 0.03 procent in de atmosfeer voor, op Venus maakt het 96 procent uit). De wolken bleken niet te zijn samengesteld uit gecondenseerd water, maar uit druppeltjes zwavelzuur. Waterdamp komt slechts voor minder dan een halve procent in de atmosfeer voor. Naar beneden toe nemen druk en temperatuur in de atmosfeer dramatisch toe.

De eerste Venera's overleefden daardoor de afdaling niet; lang voor het oppervlak in zicht was, werd de apparatuur vermorzeld. Latere tuigen werden gepantserd en gekoeld, en haalden heelhuids het oppervlak waar ze er in slaagden korte tijd te overleven. Na de landing analyseerden en

fotografeerden deze kapsules de bodem waarop ze rustten. Zoals verwacht werden dezelfde chemische elementen in ongeveer dezelfde verhoudingen aangetroffen als op aarde, maar in wat voor toestand!

De planeet is een hel. De temperatuur aan het oppervlak bedraagt een ontstellende 500° C, de druk is verpletterend, bijna honderd maal groter dan die op aarde. Ondanks de hitte staat geen blakende zon aan de hemel maar er heerst overdag steeds een macaber schemerduister. Slechts twee tot drie procent van het zonnelicht dringt doorheen het wolkendek. Bliksemschichten van onophoudelijke onweders zetten het landschap wel in fel flitsend licht, vergezeld van ratelende donderslagen.

Het is overbodig te zoeken naar leven in dit inferno. Organische moleculen desintegreren al bij temperaturen die veel lager liggen dan deze van het Venusoppervlak. In de daar heersende omstandigheden kunnen hoogstens eenvoudige, stabiele, anorganische verbindingen voorkomen. De televisiebeelden van de Venera's bevestigden wat de metingen reeds voor zeker hadden uitgemaakt: het Venusoppervlak is een rotsig en akelig milieu. Volstrekt levenloos.

Het vriendelijk gelaat van de planeet is voor goed verdwenen; wat blijft is een geteisterde en levensvijandige wereld. 'Bij elke nieuwe ontdekking', schreef Patrick Moore in 1978, 'wordt Venus minder aantrekkelijk'.

Wat blijft is heimwee naar een wereld die nooit bestaan heeft.

De maan

De maan heeft van oudsher op een bijzondere manier tot de verbeelding gesproken omdat zij het enig lichaam aan de hemel is dat iets van haar oppervlak liet zien. Anders dan de sterren en planeten, vertoont de maan reeds met het blote oog haar vorm en uitgestrektheid. Daardoor is zij eigenlijk altijd al een andere wereld geweest, eerder dan een ongrijpbaar lichtpunt aan de hemel.

Het wetenschappelijk onderzoek heeft echter nooit veel illusies gewekt wat haar bewoonbaarheid betreft. Telescopische waarnemingen leerden al vlug dat er geen atmosfeer, geen water en geen lucht is op de maan, en dat de vormen en structuren van het oppervlak enkel verklaard kunnen worden door geologische processen zoals vulkanisme, en door de inslagen van meterorieten. Van biologische activiteit valt niets te bespeuren, en de klaarblijkelijk barre omstandigheden aan het maanoppervlak lieten nooit veel ruimte tot fantaseren. Afgezien van enkele ongebreidelde geesten, die nooit helemaal kunnen worden ingetoomd, heeft niemand ooit veel aandacht aan de mogelijkheid van leven op de maan besteed.

Belangrijker dan voor het inspireren van theorieën over buitenaards leven, is de maan geweest in het stimuleren van de mens tot het verlaten van zijn planeet. Haar opvallende aanwezigheid en legendarische onbereikbaarheid vormden een ideale combinatie om de rusteloze mens aan te zetten tot het doorbreken van nieuwe grenzen. Het werd tenslotte mogelijk, technisch en financieel, halverwege deze eeuw.

De maan werd in de jaren zestig en het begin der jaren zeventig verscheidene malen bezocht. Tijdens de Apollo-expedities hebben alles bij elkaar twaalf astronauten prospectietochten uitgevoerd over het oppervlak, en enkele honderden kilogram maanstenen en -stof meegebracht naar de aarde voor onderzoek in het laboratorium.

Alleen reeds op de maanstenen van Apollo 11, de eerste die naar de aarde werd gebracht, hebben onderzoekers drieduizend verschillende testen uitgevoerd bij uiteenlopende temperaturen, in verschillende atmosferische mengsels en met verschillende voedingsbodems, voor het opsporen van eventuele organismen. Geen enkel levend wezen werd gevonden. Microscopisch onderzoek was ook niet in staat de aanwezigheid aan het licht te brengen van fossiele micro-organismen, die gewezen zouden kunnen hebben op de aanwezigheid van leven in vroegere tijden. Aan geen enkele structuur of samenstelling die in de maangesteenten werd aangetroffen kon een biologische oorsprong worden toegekend. Chemische analyses wezen uit dat ook geen moleculen in het maanmateriaal voorkomen die betrokken zouden kunnen zijn bij biologische activiteit van wat voor soort ook.

Het maanoppervlak biedt, ondanks het soms majestatisch panorama, de trieste indruk van een puinhoop. Behalve de sporadische inslag van een meteoriet gebeurt er niets. Het beeld is niet bedrieglijk. De maan is in alle opzichten volstrekt dood. Onder de zwarte hemel strekt zich een landschap uit van enkel rotsen, bergen en eindeloos veel kraters.

Als een verrassing kwam het niet. Niemand verwachtte in dit barre oord, waar geen lucht en geen water voorkomt, waar de temperatuur 's nachts tot -150° C daalt en overdag tot meer dan +120° C stijgt, enige vorm van leven aan te treffen. Toch werd bij de eerste maanreizen nog rekening gehouden met elke mogelijkheid. Meer uit principe dan uit echte voorzichtigheid werden astronauten en maanmateriaal na hun terugkeer enige dagen in quarantaine gehouden om mogelijk schadelijk contact tussen maan-organismen en de aardse biosfeer te vermijden. Al gauw bleek het nutteloze van de maatregel en na Apollo 14, de derde maanlanding, werd zij ingetrokken.

De maan was door de onderzoekers al vóór het tijdperk van de ruimtevaart als mogelijke drager van leven opgegeven. Mars echter was in de opvatting van vele astronomen, een geschikter kandidaat.

Doordat Mars anderhalve keer verder van de zon staat dan de aarde duurt één omloop rond de zon langer dan een aards jaar (687 dagen) en, wat belangrijker is, valt de oppervlakte-temperatuur er lager uit. Men kan berekenen dat tengevolge van de zwakkere zonnestraling op deze afstand de temperatuur op Mars gemiddeld ongeveer 40° C lager moet zijn dan op aarde. Dat sluit echter niet uit dat tijdelijk en plaatselijk aanzienlijk hogere temperaturen mogelijk zijn. De planeet is daardoor, naar menselijk maatstaven, koud maar niet onleefbaar. Mars wentelt éénmaal rond haar as in 24.6 uur, zodat een etmaal er vrijwel even lang duurt als op aarde. De hoek tussen de rotatie-as en het baanvlak bedraagt 24°, ook bijna gelijk aan de helling van de aardse rotatie-as. Tengevolge van deze helling kent Mars, net als de aarde, seizoenen.

Reeds in de achttiende eeuw werd waargenomen dat zich aan elke pool van de planeet een witte vlek bevindt waarvan de uitgestrektheid schommelt met de loop der seizoenen. Tijdens de zomer op een halfrond verdwijnt de poolkap daar geheel of gedeeltelijk, terwijl deze op het andere halfrond, waar het dan winter is, aangroeit. William Herschel, die deze samenhang tussen poolkappen en plaatselijk jaargetijde ontdekte, bood meteen ook een verklaring: aan de polen op Mars bevinden zich ijslagen die afsmelten als het lente wordt, en door aanvriezen weer groeien in herfst en winter.

De overeenkomst met de aarde was frappant. Ook onze planeet is getooid met witte poolkappen als gevolg van grote ijsafzettingen aan beide polen. Weliswaar krimpen de poolkappen hier slechts weinig in lente en zomer, maar dat is een gevolg van de zeer grote massa ijs die zich hier bevindt. Tijdens het korte zomerseizoen op aarde kan slechts een kleine fractie van de ijslaag, die op vele plaatsen kilometers dik is, afsmelten. Het was de astronomen niet ontgaan dat Mars wel over lucht en water beschikt, maar niet zo overvloedig als de aarde. Dat was ook niet onverklaarbaar. De kleinere massa van de planeet maakt dat de zwaartekracht aan het oppervlak slechts een derde bedraagt van die op aarde, waardoor zij vluchtige stoffen moeilijker kan vasthouden. De gassen ontsnappen gewoon in de ruimte. In de loop der miljarden jaren heeft Mars op die manier een groot deel van haar atmosfeer en watervoorraad verloren. Vandaar dat de atmosfeer ijl is, en ook de poolkappen dun moeten zijn.

Ondanks deze schaarste, zijn de overeenkomsten met de aarde treffend. Er is wind en weer op Mars. Ook wolken komen voor, vooral bij het vallen van de avond en in de koude poolstreken, maar over het algemeen toch minder dan op aarde. Stofstormen kunnen wel lelijk huishouden en

grote hoeveelheden fijn zand de lucht in blazen waar het dagen of weken blijft zweven.

De planeet heeft een overheersend rossig-bruine kleur, die doet denken aan ijzerroest, en ook al vroeg toegeschreven werd aan ijzerhoudend gesteente in de bodem. Het Marsoppervlak laat door telescopen vanop aarde niet veel details van reliëf of bodemgesteldheid onderscheiden. Toch kunnen, vooral nabij de evenaar, maar ook op hogere breedteligging, grijzige vlekken gezien worden die donker tegen de geelachtige omgeving afsteken. Opmerkelijk is dat deze formaties niet vast van vorm en uitgestrektheid zijn. Marskaarten waarop de vlekken nauwkeurig werden ingetekend tijdens opeenvolgende opposities van de planeet (perioden van gunstige zichtbaarheid) laten zien hoe de fijnstructuur ervan verandert en hoe de randen ervan zich soms over aanzienlijke afstanden verplaatsen. Volgens sommige waarnemers zijn in de vlekken ook kleurveranderingen te zien, overgangen van grijs of groen naar bruin, en deze zouden samenvallen met het verloop der seizoenen.

In de opvatting van vele onderzoekers uit de negentiende en eerste helft van de twintigste eeuw waren de donkere vlekken begroeide delen van het Marsoppervlak. De veranderingen in vorm en kleur suggereerden de aanwezigheid van een vegetatie die op de gang der seizoenen reageert. Of het ging om wouden, of steppen of een andere vorm van plantengroei was moeilijk na te gaan, maar dat plantaardig leven op Mars voorkwam stond volgens velen buiten twijfel. Toen John Herschel omstreeks 1830 de mening verkondigde dat de gele gebieden op Mars continenten zouden zijn en de grijze vlekken zeeën, opperde Flammarion het bezwaar dat deze opvatting er vanuit ging dat geen vegetatie voorkwam op het Marsoppervlak, hetgeen evident onjuist moest zijn, aangezien op Mars, zoals op aarde, lucht, water en zon voorkomt.

Sommigen gingen nog verder. Vooral nadat de Italiaanse astronoom Giovanni Schiaparelli in 1877 voor het eerst merkwaardig rechte lijnen op de planeet geobserveerd meende te hebben, verspreidde zich de opvatting dat op Mars niet enkel plantaardig leven, maar ook een hoogontwikkelde beschaving voorkomt. Schiaparelli noemde de vreemde rechtlijnige structuren 'canali', en de mening won snel veld dat het werkelijk kanalen op het Marsoppervlak betrof, kunstmatige waterlopen gegraven door intelligente Marsbewoners. In de jaren die volgden, meldden steeds meer astronomen dat zij de 'kanalen' hadden waargenomen. Kaarten werden gepubliceerd waarop de lijnen werden ingetekend, eerst tientallen, nadien honderden. Al gauw bleek dat een waar netwerk van deze waterlopen over het planeetoppervlak loopt. Op het snijpunt van twee of meer kanalen trof men soms een vlekje aan, als een oase in de woestijn waar karavaansporen elkaar kruisen.

Onovertroffen in het waarnemen van de Marskanalen was ongetwijfeld Percival Lowell, een Amerikaan die speciaal voor de studie van Mars een sterrenwacht had opgericht in Flagstaff, Arizona. Lowell zag niet alleen talrijke Marskanalen — méér dan wie ook voordien — maar hij had ook een theorie opgebouwd over de betekenis en het ontstaan ervan, die hij met glans en overtuiging verkondigde. Hij publiceerde drie boeken over Mars die bestsellers werden en de stoot gaven aan een ware Marsrage (Mars (1895), Mars and its Canals (1906), Mars as the abode of life (1909)). Volgens Lowell was Mars bewoond door een technisch hoog ontwikkelde beschaving die het planeet-omspannend kanalennetwerk voor irrigatiedoeleinden gegraven had. Mars is een vrij droge planeet, en er dient door de bewoners zorgvuldig omgesprongen met de watervoorraad. Als in het voorjaar de poolkap afsmelt, wordt het vrijkomende water in de kanalen opgevangen en zo naar lagere breedtegraden gevoerd, waar het moet dienen om de bodem vruchtbaar te maken. De kanalen kunnen tevens gebruikt worden voor transport, zodat op de kruispunten handelscentra ontstonden. Daar ontwikkelden zich vooral de steden van de Marsbewoners, en dit zijn, steeds volgens Lowell, de oasen, die men vanop aarde had waargenomen. Op het bezwaar van sommigen dat de kanalen om door telescopen vanop aarde waargenomen te kunnen worden, minstens een paar honderd kilometer breed moeten zijn, antwoordde Lowell dat wat men ziet niet de kanalen zelf zijn, maar wel de vruchtbare en begroeide stroken land die zich langs de oevers ervan uitstrekken.

De hele theorie was goed doordacht en aantrekkelijk. De ideeën van Lowell gingen er bij een breed publiek in als koek. Mars wèrd populair; de Marsbewoners alledaags. In 1900 schreef een zekere mevrouw Guzman uit Bordeaux een prijs uit van honderdduizend frank voor wie er als eerste in slaagde contact te leggen met een buitenaardse beschaving; Mars uitgezonderd wel te verstaan, want die was een te gemakkelijk doel.

Waar Lowell zelf nog bekommerd was om min of meer degelijke wetenschappelijke grondslag voor zijn theorie, zouden science fiction auteurs vlug een stortvloed Marsverhalen de wereld insturen die in geen verhouding meer stonden tot de feiten die men werkelijk van de planeet kende. Edgar Rice Burroughs, ook bekend als de geestelijke vader van Tarzan, schreef een reeks sfeervolle Marsavonturen vol trillende sensatie, waarin de theorieën van Lowell nog eens in de verf werden gezet en aan een miljoenenpubliek voorgeschoteld. Mars werd de favoriete planeet, vol exotische namen als Tars Tarkas, Xaxa en Woola, waar John Carter (van de aarde) verliefd wordt op de mooie prinses Dejah Thoris. Een hoogtepunt in de Marsliteratuur is de 'War of the Worlds' (1898) van H.G. Wells, waarin monsterachtige Marsbewoners hun van droogte wegkwijnende planeet verlaten om de veel vruchtbaarder aarde op te zoeken voor koloni-

satie. Er ontwikkelt zich een 'oorlog tussen de werelden' waarin de minder ontwikkelde aardbewoners ongetwijfeld het onderspit hadden moeten delven als niet het contact met aardse ziektekiemen de aanstormende Marsbewoners fataal zou zijn geworden.

Rond dezelfde tijd werden realistisch bedoelde voorstellen gedaan om zelf het initiatief te nemen voor een interplanetaire kennismaking. De Engelse antropoloog Francis Galton stelde voor met behulp van grote spiegels lichtflitsen naar Mars te sturen. Op die manier wilde hij boodschappen en beelden overseinen, zoals bijvoorbeeld de kustlijnen van Noord-Amerika waarvan de coördinaten in code konden worden doorgeflitst. De intelligente Marsbewoners, die ongetwijfeld door hun telescopen de aardse geografie al hadden bestudeerd, zouden het beeld zeker herkennen en opvatten als een poging van onzentwege om contact te leggen.

In de jaren twintig van deze eeuw beweerde Guglielmo Marconi, één der pioniers van de radio, dat hij radiosignalen afkomstig van Mars met zijn apparatuur had opgevangen. Charles Steinmetz, een ander elektrotechnisch uitvinder uit het begin van de twintigste eeuw, stelde prompt voor een antwoord te sturen. Indien de Verenigde Staten zich met zoveel ijver zouden inzetten om radiosignalen naar Mars te sturen, als waarmee zij deelnamen aan de Wereldoorlog, is het niet onmogelijk dat het plan lukt, betoogde hij. De astronoom David Todd, oud-collega van Percival Lowell, overtuigde de Amerikaanse regering er zelfs van te luisteren naar eventuele signalen van Mars tijdens de oppositie van 1924. Even meende men effectief signalen opgevangen te hebben maar nadien bleek het om interferenties met aardse radiozenders te gaan.

De onstuitbare Marsromantiek werd nog aangewakkerd door wetenschappelijke ontdekkingen die op zichzelf weinig aandacht gekregen zouden hebben als niet reeds een klimaat heerste waarin elk detail gretig werd aangegrepen voor verdere wilde interpretatie. In 1877, het jaar van de ontdekking der Marskanalen, ontdekte Asaph Hall van het Naval Observatory in Washington twee kleine maantjes bij de planeet. Ze ontvingen de namen Phobos en Deimos. De maantjes zijn moeilijk te observeren; latere metingen zouden een diameter van slechts ongeveer 20 kilometer voor Phobos, en 10 kilometer voor Deimos aangeven. In 1954 vond Sharpless dat de baan van Phobos, die zich het dichtst bij Mars bevindt, langzaam verkleint. Het maantje spiraleert geleidelijk naar de planeet toe. Sharpless berekende dat, als het verschijnsel zou aanhouden, Phobos binnen minder dan honderd miljoen jaar op Mars moet storten. Verschillende astronomen braken zich het hoofd voor een verklaring van dit vreemde verloop. Waarom was de baan van deze maan niet stabiel? Het was de Russische astrofysicus Shklovskii die in 1959 de meest originele uitleg

bedacht. Afremming van Phobos, zo redeneerde Shklovskii, kan enkel veroorzaakt worden door wrijving met de bovenste lagen van de Marsatmosfeer. Omdat de atmosfeer op die hoogte echter zeer ijl is, kan de wrijving slechts uiterst klein zijn. De invloed ervan op een massieve maan met de diameter van Phobos moet volstrekt verwaarloosbaar zijn. Indien Phobos echter hol was, zou zij vanzelfsprekend veel lichter zijn en ook gemakkelijker af te remmen door wrijving. Een natuurlijke maan kan niet hol zijn en daarom is Phobos, volgens de redenering van Shklovskii, ook geen natuurlijke maan. Het is een grote kunstmaan, gelanceerd door de Marsbewoners.

Wie het onaannemelijk vindt dat een kunstmaan met een diameter van enkele tientallen kilometer gebouwd kan worden, zelfs door technisch buitengewoon begaafde Marsbewoners, dient zich te realiseren, zegde Shklovskii, dat de tot dan toe voor Phobos aangenomen afmeting berust op een schatting die enkel gebaseerd is op de helderheid van het maantje. Vorm en afmetingen zijn niet rechtstreeks zichtbaar want zelfs in de grootste telescopen presenteert Phobos zich slechts als een dimensieloos puntje. Uit de helderheid van het puntje, de bekende afstanden tot de aarde en tot de zon, en het licht-weerkaatsingsvermogen van gesteenten die de vermoedelijke bestanddelen van het maantje vormen, kan dan de diameter berekend worden. Als Phobos echter een kunstmaan is, bezit zij waarschijnlijk een oppervlak van blinkend metaal. Het grote weerkaatsingsvermogen impliceert dan een diameter die veel kleiner is dan de thans aangenomene.

Ondertussen was, vanop aarde, de eerste kunstmaan gelanceerd. Het aantredend ruimtetijdperk zou het beeld van Mars drastisch aantasten.

Maar nog vóór Mariners en Vikings de planeet ontmaskerden, priemde de waarheid reeds door spleten van de papieren schutting die rond de planeet was opgetrokken. Toen Lowell, Burroughs en Wells nog bezig waren Mars te schilderen in een palet van fantastische kleuren, observeerden anderen de echte Mars en slaagden er niet in de Marskanalen te zien. De Grieks-Franse astronoom, Antoniadi, die zijn waarnemingen verrichtte met de grote 83 cm kijker van de sterrewacht van Meudon, besteedde in zijn in 1930 verschenen cartografisch meesterwerk 'La Planète Mars', vrijwel geen aandacht aan de kanalen. Op de zeer gedetailleerde Marskaart die hij in het boek publiceerde, komen ze zelfs niet voor. Het vreemde was dat Antoniadi de kanalen vroeger nochtans wel had opgetekend. Op kaarten die hij rond de eeuwwisseling had gemaakt, en die tot stand kwamen door waarnemingen met de kleinere telescoop van de Juvisy sterrewacht te Parijs, krioelde het van kanalen. Antoniadi kwam tot de paradoxale bevinding dat minder kanalen gezien worden naarmate kracht en kwaliteit van een telescoop toenemen... Hij besloot hieruit dat de kana-

len die Schiaparelli, Lowell en anderen meenden te zien, het gevolg zijn van onvoldoende optische kwaliteit van de gebruikte telescopen of ongunstige atmosferische omstandigheden tijdens de waarnemingen.

Ook andere waarnemers twijfelden aan de realiteit van de kanalen. Nathaniel Green beweerde nooit kanalen te hebben gezien, en schreef het verschijnsel toe aan een onjuiste interpretatie door de waarnemer van overgangen tussen gebieden met licht verschillende tint op het Marsoppervlak. Volgens Maunder, Cerulli, Comas Solà en anderen zijn de kanalen niet meer dan zinsbegoocheling, het gevolg van vlekjes op het planeetoppervlak, die te klein zijn om afzonderlijk onderscheiden te kunnen worden maar zich gezamenlijk wel laten zien en daarbij de indruk van geometrische lijnen opwekken. Men verrichtte proefnemingen en ontdekte dat het menselijk oog inderdaad de neiging vertoont details, die het net niet afzonderlijk kan onderscheiden, tot strepen aaneen te rijgen.

Indien Marskanalen slechts een optische illusie zijn, valt het fundament weg onder de wereld van Lowell en zijn aanhangers. Bernard Lyot en Audouin Dollfus, die vanaf de jaren vijftig Mars nauwkeurig observeerden met grote kijkers vanop de sterrenwacht van de Pic du Midi, hoog in de Franse Pyreneeën waar de meest schitterende waarnemingsomstandigheden heersen, namen de laatste twijfels weg. Zij zagen fijner details op Mars dan ooit voordien, maar géén kanalen.

De romantische Marsliteratuur beleefde, in het midden van deze eeuw, met Ray Bradbury's sprookjesachtige 'Martian Chronicles' (1950) hoogtepunten van poëzie en fantasie. Maar het triomfalisme was verdwenen. Er hangt een herfstige sfeer van nostalgie en nakende dood over het boek, waarin droom, fantasie en realiteit een onwezenlijk web vormen.

Steeds meer wetenschappelijke ontdekkingen droegen bij tot de ondergang. Lowell vermoedde reeds dat de Marsatmosfeer ijler was dan de aardse dampkring, maar het zou nog een halve eeuw duren voor men er in slaagde enigszins betrouwbare gegevens over druk en samenstelling te bekomen. In 1947 stelde Gerard Kuiper langs spectroscopische weg vast dat de Marsatmosfeer koolstofdioxyde bevat. Zuurstof en waterdamp, zo belangrijk voor het leven op aarde, konden niet worden vastgesteld. Uit metingen van de lichtverstrooiing in de Marsiaanse atmosfeer leidde men een druk af van ongeveer 80 millibar, minder dan 10 procent van de luchtdruk op aarde. Ook rees twijfel aangaande de samenstelling van de poolkappen. Misschien was als te vanzelfsprekend aangenomen dat de witte vlekken bevroren water zijn. Men realiseerde zich nu dat de gemiddelde temperatuur op Mars — een geschatte 25 graden Celsius onder het vriespunt van water — vrijwel uitsluit dat het ijs ooit zou smelten, zelfs in de zomer. Hoe kan de poolkap dan inkrimpen en zelfs geheel verdwijnen in de zomer? Nu bekend was geworden dat koolstofdioxyde in aanzienlij-

ke hoeveelheden in de atmosfeer voorkomt, werd de mogelijkheid geopperd dat de poolkappen uit koolzuursneeuw bestaan, bevroren koolstofdioxyde. Dit produkt ziet er, net als sneeuw of ijs, wit uit, zodat het onderscheid vanop aarde niet gezien kan worden. Koolzuursneeuw verdwijnt echter reeds bij aanzienlijk lagere temperatuur dan bevroren water, zodat het inkrimpen van de poolkappen dan verklaarbaar wordt. Een belangrijk verschil met water is echter, dat koolstofdioxyde bij de heersende druk op Mars nooit vloeibaar kan worden; het gaat van de vaste toestand meteen over in de gasvormige toestand. Het smelt niet, maar sublimeert.

Geleidelijk aan verloor Mars veel van wat de planeet ooit zo op de aarde had doen lijken. Aanwijzingen voor het voorkomen van intelligent leven bleken, bij nuchter beschouwen, niet te bestaan. Nu ook geen afsmeltende poolkappen voor de levering van vloeibaar water konden zorgen, en op geen andere wijze het voorkomen van deze vitale stof kon worden aangetoond, diende zelfs getwijfeld aan het voorkomen van leven, in welke vorm of graad van ontwikkeling ook. Het wisselend uitzicht van de donkere vlekken bleek ook niet noodzakelijk toegeschreven te moeten worden aan seizoensveranderingen in de plantengroei. In de opvatting van sommige astronomen konden krachtige stormen grote hoeveelheden fijn zand over het oppervlak jagen. Uitgebreide delen van het Marsoppervlak komen daardoor tijdelijk onder lichtgeel stof te liggen, en worden daarna weer schoongeveegd.

De genadeslag kwam in 1965. Mariner 4 passeerde Mars als eerste ruimtetuig in werkende conditie. Het toestel zond foto's en gegevens van de planeet door naar de aarde. Voor het eerst zag men Mars van nabij. Voor wie nog een straaltje hoop had bewaard een planeet te zien te krijgen waarop het leven of een beschaving haar stempel had gedrukt kwam de slag hard aan. Wat de beelden onthulden, was een ruw en pokdalig landschap, enkel getekend door inslagkraters als op de maan. Van Marskanalen geen spoor. Van Marsbewoners geen teken.

Door Mariner 4 werd voor het eerst ook de atmosferische druk betrouwbaar gemeten; die bleek nog tien maal lager te zijn dan vermoed op basis van eerdere schattingen. De lucht op Mars bleek nu zo extreem ijl te zijn dat ook de hoop vloeibaar water aan te treffen voor goed opgegeven moest worden: water op Mars kan vanwege de lage temperatuur vrijwel uitsluitend in vaste toestand voorkomen, en als de temperatuur uitzonderlijk toch boven het nulpunt stijgt moet het water in de ijle lucht onmiddellijk verdampen. De lucht zelf bleek bijna uitsluitend uit koolstofdioxyde te bestaan. Elke gelijkenis met de aardse dampkring was verdwenen.

Mariner 6 en 7, die vier jaar later langs Mars scheerden, konden het

beeld slechts bevestigen. Zij fotografeerden een groter deel van het oppervlak maar wat ze zagen was in hoofdzaak méér kraters.

In plaats van een tweede aarde, had men een tweede maan ontdekt. De wereld van Schiaparelli, Flammarion en Lowell was dood.

Bij het grote publiek verloor de planeet als bij toverslag haar magische aantrekkingskracht. Als doelwit voor verdere dure ruimte-expedities viel Mars uit de gunst. Omdat de voorbereidingen voor enkele volgende vluchten al ver gevorderd waren, gingen die nog wel van start, maar daarna kondigde zich een grote stilte rond deze planeet aan.

Mariner 9 werd in 1971 de eerste kunstmaan van Mars en fotografeerde het ganse oppervlak in detail. Uit de grote vloed van beelden die op aarde toestroomden, bleek dat de planeet toch meer verrassingen in petto hield dan vermoed op basis van de eerdere opnamen. Met verbazing staarden de onderzoekers naar de rijkdom aan geologische stucturen op het oppervlak. De planeet bezit een paar enorme vulkanen, de grootste torent niet minder dan 25 kilometer boven het omgevende landschap uit. Aan de evenaar werd een canyon gevonden van vierduizend kilometer lengte, als een gapende open wonde in de planeetkorst. Het meest fascinerend zijn echter een aantal uitgedroogde rivierbedekkingen, grillige gleuven met vertakkingen en brede delta's die onmiskenbaar wijzen op erosie door vloeibaar materiaal, waarschijnlijk water, in een ver verleden. Er is echter geen spoor van vloeibaar water op dit ogenblik. Blijkbaar heeft de planeet in de loop van haar geschiedenis een ingrijpende klimaatswijziging doorgemaakt, waardoor water vroeger wel, en nu niet meer in vloeibare vorm kan voorkomen. Geen spoor van leven werd gevonden op de duizenden foto's van Mariner 9.

Voor het eerst werden door Mariner 9 ook Phobos en Deimos in detail gefotografeerd. Beide maantjes bleken weinig fotogeniek; het zijn vormeloze klompen van bijna koolzwarte steen. Vooral Phobos is gehavend door groeven en kraters. Het ruimtestation van weleer blijkt niet meer dan een ruw en gebarsten rotsblok.

De nieuwe ontdekkingen boeiden de wetenschappelijke onderzoekers, maar waren niet van aard om het grote publiek opnieuw voor de planeet warm te maken. Toch heerste er weer een klimaat van groeiende verwachtigen toen in 1976 twee Viking-ruimtetuigen naar Mars vertrokken, voorlopig de laatste geplande missies naar deze planeet. De eerste echter die zouden landen op de planeet; de eerste vooral die op actieve wijze zouden zoeken naar eventueel leven op Mars. Hoop laaide weer op toch een of andere vorm van actief leven aan te treffen, geen hoogontwikkeld ongetwijfeld — daarin werd al berust — maar een primitieve vorm misschien, in staat de barre omstandigheden op de planeet te overleven. Als in een meer levensvriendelijk verleden op Mars leven zou zijn ont-

staan, is dit er wellicht in geslaagd door aanpassing aan de gewijzigde omstandigheden zich tot in de huidige tijd te handhaven. Of misschien zouden de Vikings op Mars restanten van leven kunnen aantonen, fossielen of biologische sedimentaties uit een tijd toen de atmosfeer compacter, de temperatuur milder en de bodem vochtiger was dan nu.

Beide Vikings bestonden uit twee delen: een Orbiter, die in een satellietbaan omheen de planeet zou blijven wentelen, en een Lander die zich zacht op het planeetoppervlak moest neerzetten om er een ambitieus programma van geofysische, chemische en biologische experimenten af te werken. Alle delicate maneuvers voor de satellisering, het zoeken en inspecteren van de landingsplaatsen vanuit de omloopbaan rond de planeet, de afdaling en de landing werden met succes uitgevoerd. In het najaar van 1976 hadden de Amerikanen twee werkende robots op het Marsoppervlak staan.

Aan boord van elk toestel bevond zich een uitgebreid arsenaal instrumenten voor waarnemingen en experimenten. Twee camera's speurden de omgeving af, van de horizon tot vlak aan de voet van het tuig. Een meteorologisch station mat temperatuur, windsnelheid en luchtdruk. Een grijparm kon greppeltjes graven en Marsiaanse grond opnemen om die in verschillende apparaten te deponeren voor chemisch en biologisch onderzoek. De scheikundige samenstelling werd dan vastgesteld, en verscheidene testen uitgevoerd om biologische activiteit op te sporen. Het geheel van het Viking instrumentarium liet toe op minstens vijf uiteenlopende wijzen te zoeken naar mogelijk leven:

— Met de camera's zouden eventuele organismen van meer dan een millimeter groot die zich vlakbij het landingstoestel bevonden, visueel waargenomen kunnen worden.

— Een gaschromatograaf-massaspectrometer kan de aanwezigheid van organische moleculen, van welke soort ook, in het Mars-materiaal vaststellen.

— Het 'pyrolytic release' instrument kon nagaan of op Mars een vorm van fotosynthese werkzaam is, wat op plantaardig leven zou wijzen.

— Het 'labeled release' instrument zocht naar het omgekeerde proces, ademhaling.

— Het 'gas exchange' apparaat onderzocht op meer algemene wijze of zich in de Marsbodem een of andere vorm van metabolisme voordoet, een biologische groeiactiviteit van welke aard ook.

Na maanden van drukke activiteiten op de beide landingsplaatsen, kon een balans worden opgemaakt. Die was negatief, over de hele lijn. De camera's zagen geen spoor van leven; het landschap was een dorre woestijn, bezaaid met stenen en hier en daar overdekt met duinen van los zand. Nergens beweging, behalve wat door de wind wordt veroorzaakt.

Geen Marsbewoners, geen vogels in de lucht, geen dolende dieren op de grond, geen bomen, geen gras, geen mos...

De chemische analyses brachten ook geen organische moleculen aan het licht. Alle apparaten werkten naar behoren (een kleine hoeveelheid organisch materiaal dat met opzet van de aarde was meegevoerd, werd wèl gemeten) en de metingen waren uiterst nauwkeurig, maar er werden volstrekt geen stoffen gevonden die een mogelijke biologische oorsprong zouden kunnen hebben. De drie eigenlijke biologische experimenten leverden nogal verwarde resultaten op maar die bleken eerder een gevolg van de onverwachte sterke graad van oxidatie van de Marsbodem, niet van inheems leven. Er werden vrij heftige reacties geregistreerd als het materiaal binnen het Viking-laboratorium in contact werd gebracht met water of organische voedingsstoffen. Na wat speurwerk konden de onderzoekers op aarde het gedrag verklaren door anorganische chemische processen. Geen enkele aanwijzing voor biologische activiteit kon worden gemeten.

Viking 1 en 2 hebben Mars dood verklaard. Het onderzoek heeft zich weliswaar beperkt tot slechts twee plaatsen van het Marsoppervlak en het overgrote deel van het oppervlak blijft onbetreden terrein, maar beide landingsplaatsen zijn ongetwijfeld representatief voor de planeet als geheel. Het is nauwelijks denkbaar dat het leven, als het in staat zou zijn zich op Mars te handhaven, enkel een beperkt stukje oppervlak zou innemen en niet, als op aarde, uit zou zwermen over het hele beschikbare oppervlak. Het ontbreken, niet alleen van elk spoor van leven op de beide Vikingplaatsen, maar zelfs van organische moleculen, sluit de kans uit ooit waar dan ook op deze planeet nog levende wezens aan te treffen.

De andere planeten

Geen der andere planeten of manen van het zonnestelsel werd tot hiertoe bezocht of zo gedetailleerd onderzocht als de maan, Mars en Venus. Ruimtetuigen zijn wel nog voorbij Mercurius, Jupiter, Saturnus en Uranus gevlogen, maar landingen werden daarbij niet uitgevoerd. Wel werd veel kennis over deze planeten en hun manen ingewonnen door de passerende ruimtesondes. Wat kan gezegd worden over leven op deze hemellichamen?

Mercurius lijkt op de maan, maar is nog extremer. Zonder lucht, zonder water, en met temperaturen die schommelen tussen +430 en − 189° C, is deze planeet volstrekt ongeschikt om wat voor levensvormen ook de gelegenheid te geven zich te ontwikkelen en in stand te houden.

Alle, behalve de meest eenvoudige moleculen worden in die omstandigheden genadeloos afgebroken.

Jupiter, Saturnus en de verdere planeten Uranus en Neptunus zijn, zoals eerder besproken, in omvang en samenstelling zeer verschillend van de terrestrische planeten. De levenskansen lijken er op het eerste gezicht ook niet gunstiger, integendeel. Deze planeten hebben vermoedelijk geen vast oppervlak, enkel een diepe atmosfeer van hoofdzakelijk waterstof, die naar beneden toe compacter wordt en geleidelijk in een vloeibare toestand overgaat. Aan het zichtbare oppervlak, wat in werkelijkheid de bovenkant van het wolkendek is, zijn alle joviaanse planeten zeer koud (Jupiter, de warmste, heeft aan de wolkentoppen een temperatuur van −120 tot −150° C).

Complexe chemische reacties kunnen zich bij zo lage temperaturen niet of slechts uiterst traag afspelen, en het is daarom moeilijk in te zien hoe een ingewikkelde biochemie er kan functioneren. Dieper in de atmosfeer is het wel warmer, maar hier dringt geen zonnelicht door zodat een energiebron ontbreekt die, althans voor aards leven, onontbeerlijk is. Warmte is niet genoeg; aanvoer van hoogwaardige energie, zoals licht is noodzakelijk, zoals we later zullen bespreken. Een problem is bovendien dat eventuele organismen, bij gebrek aan een vast of vloeibaar oppervlak, zwevend in de atmosfeer moeten voorkomen. De atmosfeer is echter zeer woelig. Door onophoudelijke convectieve bewegingen in de luchtlagen moeten de organismen onvermijdelijk meegesleurd worden tot op grote diepten waar zij door de hoge temperatuur vernietigd worden.

Het is nochtans interessant dat in de atmosferen van de joviaanse planeten en de Saturnusmaan Titan langs spectroscopische weg moleculen werden aangetoond, zoals methaan (CH_4), ethaan (C_2H_6) en acetyleen (C_2H_2), die aan de basis liggen van chemische verbindingen in aardse levende wezens, en daarom organische moleculen worden genoemd. Het betreft echter steeds betrekkelijk eenvoudige verbindingen die in de omstandigheden binnen deze atmosferen door spontane chemische reacties gesynthetiseerd kunnen worden. De aanwezigheid van levende wezens is daarvoor niet vereist.

Titan is bijzonder interessant omdat het waarschijnlijk de enige maan is in het zonnestelsel met een substantiële atmosfeer, die bovendien rijk blijkt aan organische moleculen. Een opvallende overeenkomst met de aarde is ook dat deze atmosfeer voor het grootste deel uit stikstof bestaat. Titan bezit vermoedelijk — eveneens als enig hemellichaam in het zonnestelsel buiten de aarde — grote hoeveelheden vloeistof op het oppervlak. (Misschien komt ook aan het oppervlak van de Neptunusmaan Triton een atmosfeer voor waarin vloeistoffen optreden; hierover is echter op dit ogenblik zo goed als niets bekend.) In tegenstelling tot de aarde is

de vloeibare materie op Titan echter geen water, maar een mengsel van ethaan en methaan.

Al deze interessante kenmerken nemen niet weg dat Titan vermoedelijk geen geschikte plek is voor de ontwikkeling van biologische activiteit. De extreem lage temperaturen remmen chemische processen zo sterk af dat voldoende dynamische en soepele structuren niet bekomen kunnen worden.

De Jupitermaan Europa heeft wel geen atmosfeer maar onder het door water-ijs bedekte oppervlak ligt waarschijnlijk een oceaan van vloeibaar water. Voortdurende wrijving als gevolg van vervormingen door de wisselende getijdekrachten houden het inwendige van deze maan op een matige temperatuur. Op de buur-maan Io, nog dichter bij Jupiter gelegen dan Europa, doet hetzelfde effect zich in nog sterkere mate voor en hierdoor is de watermassa van Io in de loop der tijden zelfs volledig in de ruimte ontsnapt. Wat overblijft, is een droog lichaam ten prooi aan heftig vulkanisme. Europa ligt op de grens tussen algeheel waterverlies en totale invriezing. Misschien komt hier ergens onder het oppervlak een zone voor die naar temperatuur en samenstelling overeenkomsten bezit met de omstandigheden in de diepzee op aarde. In dit milieu zou leven nochtans enkel kunnen overleven indien er voldoende aanvoer is van hoogwaardige energie. Op aarde wordt dit verzekerd door het zonnelicht, dat rechtstreeks wordt opgevangen door plantaardige organismen die zich op of nabij het oppervlak bevinden. Het is moeilijk in te zien hoe op de maan Europa, met haar extreem koud en gesloten, bevroren oppervlak, leven kan ontstaan en zich in stand houden.

Zolang geen vaststellingen ter plaatse zijn verricht, kan geen definitieve uitspraak gedaan worden over het al dan niet voorkomen van leven op al deze manen en planeten. Anderzijds laten fundamentele beginselen van scheikunde en fysisca, toegepast op de toestanden die heersen op deze verre planeten, weinig ruimte voor twijfel. De dynamische chemische wisselwerkingen van levensactiviteiten zijn niet mogelijk bij temperaturen die zo laag zijn dat alle moleculaire bewegingen verstarren. Hier is alleen ruimte voor kristallen, niet voor organismen.

En zelfs indien op Jupiter, op Saturnus of op een andere planeet of maan toch leven zou voorkomen, dan heeft het er zich zeker niet ontwikkeld tot een omvang en intensiteit als hier op aarde. Indien één van deze hemellichamen een biosfeer zou bezitten als de aarde, zou die niet aan de aandacht ontsnapt zijn, wat ook de chemische hoedanigheid of het fysisch uitzicht ervan is.

Leven komt in het zonnestelsel naar alle waarschijnlijkheid alleen op aarde voor. Leven dat zich tot een stralend en planeetomspannend verschijnsel heeft ontwikkeld, komt in het zonnestelsel met zekerheid alleen op aarde voor.

5

Een planeet uit evenwicht

De toestand aan het oppervlak van de aarde wijst op een aanhoudende activiteit. De natuur is op deze planeet niet in evenwicht. Er zijn transformaties aan de gang die niet tot rust schijnen te komen.

Uit de samentrekkende gasnevel waaruit vijf miljard jaar geleden de zon is ontstaan, vormde zich ook de aarde, een gecondenseerde massa steen, water en een beetje lucht. Ongepland en door niemand bedoeld, ontstond zij uit een spel van blinde krachten en volgde willoos haar onuitgestippelde baan. Zoals voor de andere planeten, moet voor deze aarde een bestaan zijn weggelegd zonder doel, bestemd weg te zinken in eeuwige onverschillige rust.

Maar later, veel later, roert deze planeet zich op heel eigen wijze. Alles groeit, overal is beweging, uit de stenen bodem richten zich gebouwen op en de lucht trilt van taal en muziek. Leven doorwoelt de hele aarde, in ontelbaar veel vormen, gedreven door een onbeheersbare innerlijke drang.

De materie op deze planeet weigerde de opgelegde rust en kwam tot leven. Complexiteit kwam in de plaats van stabiliteit. Evolutie in plaats van eeuwigheid. Eigen wil in plaats van natuurwetten. Er is nu bewustzijn waar ooit enkel lucht, water en stenen werden gevonden.

Naar buiten blijft de aarde, met haar onopvallende afmetingen, op het eerste gezicht nog steeds een gewone planeet. Maar de vermomming is dun geworden. Het leven heeft deze planeet zo in haar greep dat de trekken ervan zich vanop grote afstand beginnen te vertonen. De biosfeer omspant de ganse aarde en zet haar in een surrealistisch groen. Overal wordt het lanschap beheerst door de vreemde vormen van levende wezens, bewegend of in de bodem ingeplant maar altijd in voortdurende afwisseling. De elektromagnetische vibraties van de mens beroeren nu de verre interstellaire ruimte.

De groei van het levensverschijnsel op deze planeet lijkt onstuitbaar. Mensen en hun produkten verlaten uiteindelijk de aarde en bevruchten

de omgevende planeten en hun manen. Geen enkele grens heeft het leven ooit gerespecteerd. Ook de grenzen van de eigen planeet worden nu overschreden.

Het is een vreemde en niet te begrijpen ontwikkeling. Hoezeer het verschijnsel dat we zelf zijn, ons vertrouwd zou moeten voorkomen, ik kan niet wennen aan het onwaarschijnlijke van wat deze planeet overkomt. Er valt niet meer te ontkomen aan het inzicht dat wat zich hier afspeelt een afwijkend en misschien uniek fenomeen is, een geniale opstand tegen de natuur, geslaagd tegen alle regels van het spel in. Het fascinerende en onbegrijpelijke is het succes van dit door niemand uitgedachte, door niets georganiseerde initiatief. De uitvoerders ervan zijn de levende wezens, de vruchten zelf van het plan. Het ontbreekt hier op aarde misschien aan logica, maar niet aan handigheid.

De planeten gedragen zich veeleer zoals verwacht kan worden van lichamen met de samenstelling die ze bezitten. Geen weerstand daar tegen het voorbestemde lot. De wolken op Venus, het zand op Mars leiden een ongeanimeerd bestaan in volstrekte aanvaarding van hun lot. Het ontbreken van elk leven op deze planeten is in harmonie met het te verwachten onvermogen van de elementen om georganiseerde en bezielde vormen van bestaan te realiseren. Berusting is alles wat we er aantreffen.

Chemische ongerijmdheid

Wat kan de oorzaak zijn van de zo uiteenlopende atmosferische en oppervlakte-toestanden die we op de verschillende planeten aantreffen, zelfs in gelijkaardige omgevingen binnen het zonnestelsel zoals bij Mars en Venus? Laten we, voor een verdere beschouwing van het probleem dat wezelf zijn, nogmaals een beroep doen op een vreemde waarnemer, die met intelligentie en zonder vooringenomenheid onze planeet observeert. Misschien moet een totale onwetendheid van de toedracht hier op aarde nu niet meer verondersteld worden. We kunnen aannemen dat de aandacht van onze waarnemer eerder op de aarde gevestigd werd door de merkwaardige radio-uitzendingen van deze planeet. Geboeid door deze ontdekking doorkruiste hij de interstellaire ruimte op weg naar de zon, in de hoop de oorsprong van het verschijnsel te achterhalen. Aangekomen in het zonnestelsel moet hij zonder moeite de aarde, derde planeet van de zon, als bron van al het radio-rumoer hebben kunnen aanwijzen. Nemen we echter aan dat hij niet onmiddellijk op deze planeet afstevende, maar een positie koos in de nabijheid ervan, op Mars bijvoorbeeld, om van daaruit de aarde verder gade te slaan. Vanuit die standplaats is hij in staat

onze planeet gedetailleerd te bestuderen, en door middel van spectrografische onderzoekingen iets over de chemische toestand nabij het aardoppervlak af te leiden.

Vanop Mars biedt de aarde door een telescoop een adembenemend mooi gezicht. Zij presenteert zich, klein en ver, als een blauwe, witgevlekte bol, in het voortdurende gezelschap van de maan, die er lijkkleurig bij staat. Onze waarnemer is in staat de aswenteling van de planeet te observeren en kan zo het wisselende verloop van dag en nacht over de oceanen en continenten volgen. Subtiele kleurvariaties op de continenten verraden iets van de gang der seizoenen. Het spel van de wolken laat de verscheidenheid zien in weer en klimaat op de planeet. De atmosfeer zelf van de aarde trekt vooral zijn aandacht. Het opmerkelijke ervan is niet in de eerste plaats de azuurblauwe kleur, of het loutere feit dat ze veel compacter is dan de Marsatmosfeer; het is de chemische samenstelling die zo bijzonder is — raadselachtig zelfs.

Een spectraalanalyse van de ultraviolette en infrarode straling afkomstig van de aarde leert de Marsiaanse waarnemer welke chemische bestanddelen in de dampkring van onze planeet voorkomen. Niet alle componenten zijn even gemakkelijk te detecteren, want sommige laten door hun typische licht-absorberende eigenschappen in de spectra duidelijker sporen na dan andere, maar in principe kan een redelijk nauwkeurige analyse van de aardatmosfeer vanop Mars uitgevoerd worden. We nemen aan dat de waarnemer de praktische problemen heeft opgelost en zich een betrouwbaar beeld van de samenstelling van de aardatmosfeer vormt.

En dat is dan, voor wie het niet altijd al zo gewend is, een verbijsterend beeld, een chemische ongerijmdheid.

De aarde blijkt een atmosfeer te bezitten van 78 procent stikstof en 21 procent zuurstof. De rest is argon, en een heel klein beetje andere gassen. Dat is een samenstelling die, zoals onze waarnemer vaststelt, volkomen afwijkt van die op de buurplaneten, die chemisch overigens globaal op dezelfde wijze zijn samengesteld. Ondanks de onderling belangrijke verschillen in temperatuur en atmosferische druk op Venus en Mars, hebben beide planeten een dampkring met sterk gelijkende chemische samenstelling. De aardse atmosfeer echter, die qua temperatuur en druk het midden tussen die van de buurplaneten houdt, wijkt in samenstelling volkomen af. Koolstofdioxyde, dat op Mars en Venus voor meer dan 95 procent voorkomt, maakt van de dampkring van de aarde niet meer dan 0.03 procent uit.

Het frappante van de aardatmosfeer is niet alleen dat de samenstelling ervan abnormaal is, in die zin dat een gelijkaardig mengsel op geen andere plaats wordt aangetroffen, maar vooral ook, dat deze combinatie van gassen een chemische onmogelijkheid is. Als onze waarnemer noties

van scheikunde bezit — en dat nemen we aan — moet hij zich het hoofd breken over de merkwaardige toestand in de aardatmosfeer. Stikstof en zuurstof gaan evenmin samen als waterstof en zuurstof, of ijzer en zuurstof, of vele andere combinaties van met elkaar reagerende elementen. In al deze gevallen zullen beide elementen niet afzonderlijk blijven bestaan maar een stabiele verbinding vormen (water bij de reactie tussen waterstof en zuurstof, en ijzerroest in het geval van ijzer en zuurstof). De tijdschalen verschillen eventueel. Waterstof kan zich zeer snel met zuurstof verbinden terwijl de reactie met ijzer veel trager verloopt. In de aardatmosfeer zouden zuurstof en stikstof zich met elkaar moeten verbinden om stikstofoxyden te vormen. Het tempo van deze reactie is wel traag, maar de natuur beschikt over zoveel tijd dat dit geen factor van betekenis kan zijn.

De aarde is bijna vijf miljard jaar oud, meer dan tijd genoeg opdat alle zuurstofatomen uit de atmosfeer zich al lang aan stikstofatomen gebonden zouden hebben. Wel is er voor deze reactie een bepaalde hoeveelheid energie nodig, want zuurstof en stikstof komen beide, zelfs in ongebonden toestand, niet als losse atomen voor maar onder de vorm van moleculen (twee zuurstof-atomen vormen een zuurstofmolecule, en ook zo voor stikstof). Deze moleculen moeten opengebroken worden vooraleer de reactie plaats kan vinden, en dat vergt enige energie. Bronnen voor deze zogenaamde activatie-energie zijn in het aardse milieu echter voldoende voorhanden, zodat de reactie daardoor niet belemmerd hoeft te worden. De ultraviolette straling van de zon of elektrostatische ontladingen in de atmosfeer (bliksems) kunnen die rol spelen. Met de energie die hierdoor beschikbaar is, zou de stikstof-zuurstof atmosfeer zich op hooguit enkele miljoenen jaren volledig moeten kunnen omzetten; ruimschoots snel genoeg dus om al heel lang een voltooid feit te zijn.

Het lijkt daarom onbegrijpelijk dat de aardse dampkring nog steeds een samenstelling heeft waarin vrije zuurstof voorkomt. Alleszins verkeert een atmosfeer in dergelijke toestand niet in chemisch evenwicht. Stikstof en zuurstof moeten zich chemisch omzetten en zolang dit niet gebeurd is, kan de definitieve toestand van onze atmosfeer niet bereikt zijn. Op Mars en Venus, waar bijna geen vrije zuurstof of andere reactieve elementen in de atmosfeer voorkomen, heerst bij benadering wel chemisch evenwicht. Koolstofdioxyde, dat er vrijwel de ganse atmosfeer uitmaakt, is een stabiele molecule die onbeperkte tijd kan blijven bestaan zonder de neiging te vertonen uiteen te vallen of zich met andere produkten te verbinden.

Indien de stikstof in de aardatmosfeer geoxydeerd zou worden, moeten de gevormde stikstofoxyden in de aanwezigheid van vloeibaar water nitraten doen ontstaan. Deze nitraten vormen zouten die goed oplosbaar

zijn in water. De aardatmosfeer zou daardoor voor een groot deel in de oceanen terecht moeten komen. Uiteindelijk moet dit leiden tot een luchtlaag die anders is samengesteld en bovendien ijler is, terwijl het oceaanwater zouter moet worden. Dergelijke in water opgeloste nitraten vormen de chemisch meest stabiele toestand waarin de elementen zuurstof en stikstof gezamenlijk voorkomen. Het is daarom de toestand die verwacht kon worden spontaan op te treden. Het is echter verre van de toestand die wordt aangetroffen.

Het vreemde van de aarde manifesteert zich voor een buitenaards waarnemer daarom zelfs zonder dat deze reeds iets opvangt van de levende wezens aan haar oppervlak of van de technische voortbrengselen van de mens. Het abnormale van deze planeet is terug te vinden in haar luchtmantel.

Uit evenwicht

Maar hoe moet de situatie begrepen worden? Op welke wijze kan de atmosfeer van een planeet na miljarden jaren nog niet een samenstelling in chemisch evenwicht hebben bereikt? De toestand is wellicht toch niet zo ongerijmd als op het eerste gezicht mag lijken. Geen enkele planeetatmosfeer die door de zon beschenen wordt, kan volkomen in chemisch evenwicht verkeren. De ultraviolette zonnestraling is in staat moleculen in de atmosfeer te splitsen, zoals eerder gezegd. Door deze fotolyse worden voortdurend losse atomen en atoomgroepen, fragmenten van moleculen, geproduceerd. Deze zijn chemisch zeer reactief en zetten verdere reacties op gang. Door de fotolyse van waterdamp bijvoorbeeld, ontstaan losse atomen waterstof en zuurstof. Waterstofatomen ontsnappen gemakkelijk van de aarde omdat ze zo licht zijn, maar zuurstof blijft in de atmosfeer achter. De zuurstofatomen reageren met andere elementen in atmosfeer en bodem, onder vorming van allerlei oxyden. Het is op die wijze dat de aanvankelijk waterstofrijke atmosferen van de terrestrische planeten in geoxydeerde atmosferen werden omgezet.

Het proces van fotolyse en selectieve ontsnapping verklaart wel niet de huidige samenstelling van de aardatmosfeer, maar grotendeels wel die van Mars en Venus. Gassen als methaan (CH_4) en waterdamp (H_2O) kwamen aanvankelijk overvloedig voor op alle deze planeten, maar werden sindsdien vrijwel volledig omgezet in het zuurstofrijke koolstofioxyde (CO_2) tengevolge van fotolyse van methaan- en watermoleculen en van de daaropvolgende ontsnapping van de waterstofatomen.

Ook nu nog schijnt de zon en doet fotolyse haar werk. Vooral hoog in de atmosfeer worden daardoor nog steeds chemische reacties opgewekt,

met als belangrijkste resultaat het verlies van waterstof uit de atmosfeer. Zolang er bovendien aanvoer is van moleculen in de atmosfeer door bodemerosie, verdamping, ontgassing en vulkanisme, komen bestanddelen voor in de lucht die er niet definitief in thuis horen. Fotolyse, ontsnapping en chemische processen doen dan hun werk, en de atmosfeer is scheikundig niet helemaal in chemisch evenwicht.

Het is echter wel onvermijdelijk dat er zich geleidelijk aan een toestand instelt van quasi-evenwicht. Kort na het ontstaan van de planeten vormden zich de atmosferen door massale ontgassing van het vaste planetenlichaam, maar daarna ging de vrijmaking van gassen veel kalmer of viel die zelfs bijna helemaal stil. Alles wat in de atmosfeer kan reageren, of alles wat van de planeet kan ontsnappen, krijgt daar dan ruimschoots de tijd voor. Venus en Mars bevinden zich beide in een dergelijke vergevorderde toestand van bijna-evenwicht. Miljarden jaren planetaire geschiedenis hebben hier hun vernietigende sporen nagelaten. Chemisch ligt alles op deze planeten nu zo goed als stil.

Op Jupiter en de verdere planeten zijn de omstandigheden weer anders. De grote massa van deze planeten geeft hen een sterke zwaartekracht, terwijl de lage temperaturen die er heersen slechts geringe atomaire en moleculaire snelheden toelaten. Hierdoor blijven ook de lichtste bestanddelen, met inbegrip van atomair waterstof, op deze planeten vrijwel definitief gevangen. De atmosferen van de joviaanse planeten bezitten daarom nog steeds ongeveer de oorspronkelijke samenstelling. Toch zijn ook deze atmosferen niet helemaal in chemisch evenwicht. Dit blijkt bijvoorbeeld uit de vastgestelde aanwezigheid van koolstofmonoxyde (CO) en waterstofcyanide (HCN) in geringe hoeveelheden in de Jupiteratmosfeer. Ook hier is de zonnestraling, hoewel verzwakt op deze afstand, nog actief waardoor chemische reacties lopen. De gekleurde wolken in de atmosferen van Jupiter en Saturnus wijzen op het voorkomen van allerhande verbindingen, waaronder waarschijnlijk vrij complexe koolwaterstoffen, waarvan aanmaak en fotolytische ontbinding nog voortdurend doorgaan.

Toch zijn deze toestanden niet vergelijkbaar met deze op aarde. Op Jupiter bevinden zich waterstofrijke moleculen in een waterstofrijke atmosfeer, en dit is een toestand die chemisch ongeveer in evenwicht moet zijn, ook al is er nog enige scheikundige activiteit. De stoffen die aangetroffen worden zijn de te verwachten verbindingen in een milieu met dergelijke globale samenstelling, waar nog energie binnenstroomt onder de vorm van zonnestraling, atmosferische elektriciteit en plasmastromen uit de magnetosfeer.

Op aarde echter verkeert de atmosfeer vèr uit evenwicht. De atmosfeer hier is arm aan waterstof en rijk aan zuurstof, zoals ook op Mars en

Venus, maar in tegenstelling tot deze beide laatste, is de atmosfeer niet geoxydeerd. Er komen op aarde dus juist niet de verbindingen voor die normaal in een milieu met deze globale samenstelling verwacht konden worden. Het gasmengsel waaruit onze atmosfeer bestaat, is geladen met chemische energie die vraagt om vrijgemaakt te worden. Het is een atmosfeer die zich in meer stabiele verbindingen om zou moeten zetten, maar daartoe blijkbaar niet de kans krijgt. De aardse dampkring heeft meer weg van een brandstofmengsel dan van verbrande uitlaatgassen.

De buitenaardse waarnemer, die onze planeet vanop Mars met stijgende verbazing onderzoekt, doet na nauwkeurig spectraal-analytisch onderzoek nog verrassender vaststellingen. Een gedetailleerde studie van infrarood spectra van de aarde toont aan dat in de dampkring, behalve de reeds genoemde bestanddelen, nog een aantal verbindingen in kleine maar niet verwaarloosbare hoeveelheden voorkomen. De aanwezigheid ervan is nog onbegrijpelijker dan het vreemde samengaan van de hoofdbestanddelen reeds was. Zo vindt onze onderzoeker methaan (CH_4), dat voor 0.00015 procent in de aardatmosfeer voorkomt, en ammoniak (NH_3), voor ongeveer een miljoenste van een procent. De concentraties zijn niet groot, maar toch komen ze neer op een totale hoeveelheid van ongeveer vier miljard ton methaan en enkele miljoenen ton ammoniak in de totale atmosfeer. Beide gassen reageren echter zeer snel met zuurstof. Er is dit keer zelfs geen sprake van een tijdschaal van miljoenen jaren voor de reactie, maar van nauwelijks enkele jaren. Op hoogstens een paar jaar tijd moet normaal al het methaan uit de atmosfeer door oxydatie verdwenen zijn. Voor het ammoniak gaat het nog sneller. Enkele dagen kunnen volstaan om de volledige voorraad te doen verdwijnen.

Hoe kunnen deze gassen dan in deze zuurstofrijke atmosfeer voorkomen en er een bestendig deel van uitmaken? De snelheid waarmee methaan en ammoniak door chemische reacties onvermijdelijk uit de atmosfeer worden weggenomen, dient noodzakelijk gecompenseerd door een even snelle en ononderbroken produktie van deze stoffen. Maar het moet voor een vreemdeling die zopas deze ontdekkingen heeft gedaan niet te vatten zijn welke processen voor een dergelijke geweldige chemische activiteit verantwoordelijk kunnen zijn. Om de samenstelling van de aardatmosfeer in stand te houden, dienen jaarlijks twee miljard ton methaan geproduceerd te worden, en anderhalf miljard ton ammoniak. Geen van de fotochemische, atmosferische of geologische processen die normaal optreden, is in staat dat klaar te spelen.

De raadselachtige werkelijkheid van de aarde stelt zich met deze waarnemingen nog wel niet in volle omvang, maar toch reeds in grote duidelijkheid. Op geheimzinnige wijze houdt deze planeet zich onafgebroken in een toestand van niet-evenwicht. Daarbij creëert zij een milieu

met een op zichzelf onstandvastige, onwaarschijnlijke en bizarre samenstelling.

Wie het zonnestelsel overschouwt en de contrasten tussen de planeten opmerkt, verbaast zich niet zozeer over Jupiter, over Mars of over Venus, want wat op deze planeten wordt aangetroffen zijn de voorspelbare gedaanten van de natuur. Het is de aarde, met haar mysterieuze atmosfeer die fascineert en elke uitleg tart.

6

Het bestendig onevenwicht

De niet-evenwichtstoestand van de aarde wordt in stand gehouden door het leven, dat zelf de meest uitgesproken vorm van niet-evenwicht is. Door haar biologische activiteit neemt de aarde eigen lot en zekerheid in handen.

Het beeld van de aarde als een unieke plaats in het heelal lijkt onaanvaardbaar na de copernicaanse en darwiniaanse ervaringen van de voorbije eeuwen. Een dergelijk beeld plaatst ons centraler in de kosmische orde dan toegelaten volgens hedendaagse opvattingen. In strijd met een zekere intuïtie is het misschien niet, maar intuïtie als leidraad dient gewantrouwd. Het enige wat zekerheid kan brengen, is het begrijpen zelf van de situatie.

Begrijpen is herleiden tot wat als bekend of evident wordt ervaren. Als we het ongewone van de omstandigheden op aarde willen begrijpen, moet gezocht worden naar een oorzaak die zelf begrepen wordt of om geen nadere uitleg vraagt. We kunnen daartoe het milieu op deze planeet analyseren en de functies ervan trachten te ontrafelen. We kunnen echter ook deze details opzij schuiven en het heelal in zijn geheel beschouwen. Het heelal blijkt namelijk globaal niet in evenwicht te verkeren. Hoe zou het dan anders kunnen zijn op aarde? Via deze omweg zou een ander licht op de aardse situatie kunnen vallen, minder schril misschien en daardoor wellicht gemakkelijker te begrijpen en te aanvaarden.

Kleur en temperatuur

Alles in het heelal is in beweging, overal is actie en onrust. Van de uitdijing van de kosmische ruimte, tot de fusie-reacties tussen de atoomkernen in het inwendige van de sterren; alles is in beroering. Het heelal heeft blijkbaar zijn definitief evenwicht nog niet gevonden. Wel beschouwd is dit een verrassende toestand.

Ervaring leert dat een toestand van niet-evenwicht spontaan naar

evenwicht streeft en dus slechts van tijdelijke aard is. Een vallende steen vindt evenwicht zodra hij de grond bereikt. Een chemische reactie komt tot stilstand zodra de concentraties van de stoffen hun evenwichtswaarden hebben gevonden. Temperatuursverschillen verdwijnen onder invloed van de warmtestromen die door de verschillen zelf worden opgewekt. Steeds stroomt warmte spontaan van warm naar koud, niet omgekeerd. Waarom bevindt het heelal zich dan niet reeds lang op gelijkmatige temperatuur? Waarom zijn niet alle chemische reacties reeds stilgevallen? Waarom is nog niet elk voorwerp dat kan vallen, gevallen? Kortom, waarom zijn in het heelal niet alle krachten reeds uitgebalanceerd, alle verschillen weggeëffend, elke activiteit stilgevallen?

Zijn de tien of twintig miljard jaar dat het heelal nu bestaat, niet voldoende geweest om dat totale evenwicht tot stand te brengen? Of wordt de wereld door een onafwendbare drijvende kracht gedwongen steeds verder te evolueren, als het water van een rivier dat naar zee blijft stromen, onverschillig hoeveel water eerder reeds in de zee terecht kwam?

Blijkbaar onuitputtelijke reservoirs van energie en inspiratie houden de natuur draaiende. Sterren blijven licht stralen in de onverzadigbare ruimte en galactische nevels houden niet op nieuwe sterren te vormen, onverschillig hoeveel licht of hoeveel sterren eerder reeds werden geproduceerd. De energie die door de sterren wordt uitgestraald, zet heel het universum in brand. Overal wordt er nieuwe activiteit door op gang gezet. Dat de aardatmosfeer chemisch niet in evenwicht verkeert, is fundamenteel een gevolg van de straling van een ster in haar nabijheid, de zon.

Met haar energie verwarmt de zon ononderbroken het aardoppervlak. De aarde zelf straalt de ontvangen warmte weer uit onder de vorm van infrarode straling. Er bestaat een thermisch evenwicht tussen zon en aarde, waarbij deze laatste per eenheid van tijd gemiddeld evenveel warmte ontvangt als ze zelf uitstraalt. Het evenwicht stelt zich spontaan in: mocht de aarde warmer worden, dan zou haar energie-afgifte groter worden dan de opwarming door de zon waardoor zij zou afkoelen, en omgekeerd. Het thermisch evenwicht tussen aarde en zon verhindert echter niet dat een ander, nauw daarmee verbonden on-evenwicht bestaat: de temperatuur van de grond en de kleur van het licht zijn niet met elkaar in overeenstemming. Het is interessant dit aspect van de aarde-zon relatie hier iets nader te ontleden.

De temperatuur aan het oppervlak van de zon bedraagt ongeveer 6 000° C. De straling die de zon uitzendt, is in kleur en intensiteit karakteristiek voor een voorwerp op deze temperatuur. Als de zonnestraling de aarde bereikt, heeft ze zich over een grote ruimte uitgespreid (waarvan de

aarde maar een zeer klein deel in beslag neemt) waardoor haar energiedichtheid veel lager is geworden. Deze ijlere straling is niet meer in staat een zo hoge temperatuur op te wekken en daardoor komt het dat de aarde onder invloed van deze zonnestraling niet zo warm wordt als de zon zelf is.

Ondertussen is de kleur van de zonnestraling wel gelijk gebleven, want die verandert niet tijdens het transport van zon naar aarde. Licht kan opgevat worden als een stroom van energie-dragende deeltjes, zogenaamde fotonen. De energie van een foton hangt af van de kleur van het licht, zij is groter voor blauw dan voor rood bijvoorbeeld. De kleur van het licht hangt op zijn beurt af van de temperatuur van het voorwerp dat het licht uitzendt. Koele sterren stralen rood licht, hete sterren vooral blauw en zelfs ultraviolet licht. Als de fotonen van de zon de aarde bereiken, correspondeert hun energie daardoor niet meer met de temperatuur die op aarde heerst. Zij bezitten nog steeds de oorspronkelijke hoge energie, overeenkomend met de temperatuur van het zonneoppervlak, maar bevinden zich nu in een omgeving met veel lagere temperatuur.

De temperatuur die samenhangt met de kleur van het licht en de energie van de fotonen, wordt de stralingstemperatuur genoemd. Wat een thermometer op aarde (in de schaduw!) meet, is de kinetische temperatuur van de lucht, zo genoemd omdat zij een maat is voor de bewegingsenergie van de atomen en moleculen. Er is dus een belangrijk verschil tussen de stralingstemperatuur en de kinetische temperatuur. Het is tengevolge van dit verschil dat het aardse milieu niet in evenwicht verkeert, een niet-evenwicht dat niet van voorbijgaande aard is maar voortduurt zolang de zon schijnt.

De fotonen in het aardse milieu beschikken over aanzienlijk meer energie dan het geval zou zijn indien de straling in evenwicht was met de materie hier. Nu dit niet zo is, kunnen zich in de heersende lage (kinetische) temperatuur op aarde processen afspelen die eigenlijk een veel hogere temperatuur vergen omdat ze op gang gezet moeten worden door energie-rijke fotonen. De eerder besproken fotolyse is hiervan een voorbeeld. Chemische reacties die een aanzienlijke activatie-energie vergen omdat de moleculen gesplitst of geëxciteerd moeten worden vooraleer de reactie kan doorgaan, kunnen in die omstandigheden van start gaan want de fotonen leveren de noodzakelijke energie. Anderzijds zorgt de lage kinetische temperatuur ervoor dat de gevormde produkten, die eventueel een delicate moleculaire structuur bezitten, gedurende lange tijd veilig bewaard kunnen blijven. Bij hogere temperaturen zouden deze verbindingen door de grote botsingsenergieën van de deeltjes ongetwijfeld snel worden afgebroken.

De combinatie van hoge stralings- en lage kinetische temperatuur op

aarde laat dus een bijzondere chemie toe waarin zowel stabiliteit van complexe verbindingen als vlotte reactiesnelheden mogelijk zijn. Op een wereld zonder zon, waar toch dezelfde kinetische temperatuur zou heersen als hier op aarde (doordat de warmte bijvoorbeeld afkomstig zou zijn van een hete kern in het inwendige), zou de chemische activiteit in de atmosfeer snel stilvallen.

De toestand van niet-evenwicht tussen de temperatuur van straling en materie is vanzelfsprekend niet uniek voor de aarde; zij komt op alle planeten voor, ook daar waar desondanks rust en chemisch evenwicht heersen. De hier besproken uitleg kan daarom geen echte verklaring bieden voor de typische situatie op aarde. Wel blijkt eruit hoe het voorkomen van chemische activiteit essentieel samenhangt met het bestaan van een grootschalig kosmisch niet-evenwicht. Het heelal zelf lokt een toestand als die op aarde uit, ook al is die toestand niet een noodzakelijk gevolg van de kosmische omstandigheden zoals blijkt uit de doodse situatie op het merendeel der planeten.

De hoge stralingstemperatuur werkt als een motor die de chemische machine op aarde aandrijft. Voor de eigenlijke oorzaak van de specifieke toestand waarin de atmosfeer hier verkeert, moet echter een aanvullende verklaring gevonden worden.

De rol van het leven

Wij zijn, als aardbewoners, vanzelfsprekend innig vertrouwd met de toestand op deze planeet. Het kan ons daardoor moeilijk vallen het atypische van deze plaats onder ogen te zien, en daarom hebben we eerder reeds een objectieve derde te hulp geroepen. Laten we nu echter verder afzien van de diensten van deze buitenaardse waarnemer en voortgaan op eigen inzichten. We beschikken tenslotte, als directe toeschouwers en deelnemers, ontegenzeggelijk over een flinke dosis kennis terzake.

Wij weten dat — wat de waarnemer vanop Mars niet kon zien — het aardoppervlak door levende wezens bevolkt is en dat die uitzicht en samenstelling van het milieu hier in sterke mate bepalen. Niet zand en steen, maar bomen, struiken en gras domineren het landschap op de meeste plaatsen. Geen zuiver water vult de oceaanbekkens, maar wel een mengsel van water en tal van anorganische en organische stoffen dat krioelt van ontelbare zwevende en zwemmende wezens. Overal wemelt het van het leven. We weten dat deze organismen groeien en zich voortplanten en een intense activiteit ontplooien waarbij ze het ganse milieu transformeren en voor eigen gebruik aanwenden. Miljarden en miljarden van deze wezens, in de meest uiteenlopende vormen en afmetingen, krui-

pen en lopen en vliegen over de aarde. Ze vormen tesamen een dunne laag van uiterst complexe, actieve en georganiseerde materie over het oppervlak van deze planeet: de biosfeer.

Wetenschappelijke waarnemingen brachten de volle betekenis van die activiteit aan het licht. We weten daardoor dat het de biologische processen zijn die de abnormale atmosferische samenstelling op aarde in stand houden. Planten slagen erin door fotosynthese de koolhydraten waaruit ze zijn opgebouwd zelf samen te stellen. Zij verbruiken daarbij koolstofdioxyde en water, die via een complexe weg met talrijke tussenstappen in koolhydraten en zuurstof omgezet worden. Een onmisbaar element voor het verloop van deze fotosynthese is zonnelicht. Chlorofyl, het groene bestanddeel van bladeren en stengels, vangt het licht op en zet het om in geschikte vorm waardoor het proces zich kan voltrekken. De zuurstof die bij de fotosynthese geproduceerd wordt, lozen de planten in de lucht.

Sinds de planten hier ruim drie miljard jaar geleden mee begonnen zijn, werden enorme hoeveelheden zuurstofgas vrijgemaakt. In de primitieve aardatmosfeer, vóór chlorofyl-houdende planten op aarde hun verschijning deden, kan slechts weinig vrije zuurstof aanwezig geweest zijn, hoogstens één of twee procent afkomstig van fotolyse van waterdamp. Door de fotosynthese is dit bedrag vrij snel opgeklommen tot de huidige waarde van 21 procent, waarop het sindsdien met merkwaardige standvastigheid gehandhaafd blijft.

Het is dus eigenlijk het plantaardig leven op deze planeet, dat onze waarnemer op Mars ontdekt heeft toen hij de hoge concentratie zuurstof in de dampkring vaststelde en zich realiseerde dat die voortdurend dient aangevuld om het verlies door spontane oxydatie-processen te compenseren. Het zijn de wieren, mossen, varens, grassen, bomen, verspreid over de talrijke ecosystemen van oceanen en continenten die deze gigantische zuurstofproduktie voor hun rekening nemen. Ook de andere vreemde bestanddelen in de aardatmosfeer, zoals methaan en ammoniak, vinden hun oorsprong in biologische activiteiten. Deze gassen worden allebei door de ontbinding van afgestorven organismen vrijgemaakt. Vooral bacteriën dragen belangrijk bij tot de opruiming van restanten van planten en dieren door deze chemisch af te breken en het materiaal onder de vorm van eenvoudige moleculen opnieuw in de atmosfeer te brengen. Daar kunnen deze stoffen dan, eventueel na oxydatie, weer voor de levensprocessen gebruikt worden.

Zolang de aardse biosfeer voortbestaat, zullen deze cycli aan de gang blijven en zullen zekere concentraties van dergelijke produkten in de atmosfeer voorkomen. Het is een vorm van milieuvervuiling, bedreven door het leven zelf dat zijn afvalprodukten op grote schaal in de atmosfeer

loost. Zolang het leven er is, bevindt de atmosfeer zich dan ook niet in chemisch evenwicht.

Het leven op aarde is verantwoordelijk voor de afwijkende atmosfeer die deze planeet bezit. Omgekeerd kan uit de meer normale samenstellingen van de atmosferen van de overige planeten besloten worden dat daar geen leven voorkomt. Er was, achteraf beschouwd, geen bezoek van ruimtetuigen aan Mars of Venus nodig om te ontdekken dat deze planeten geen leven herbergen. De volledig geoxydeerde, in chemische rust verkerende atmosferen spraken reeds duidelijk taal. Nu toch ter plaatse onderzoek op deze planeten kon worden verricht, is ook voor de sceptici de twijfel weggenomen.

Het leven handhaaft de niet-evenwichtstoestand op aarde, maar het leven is zelf een toestand van extreem niet-evenwicht. Levende wezens zijn opgebouwd uit voornamelijk eiwitten, vetten en koolhydraten, stoffen die rijk zijn aan de elementen koolstof en waterstof. Al deze produkten reageren vlot met zuurstof om de stabielere moleculen van koolstofdioxyde en water te vormen. De organische stoffen zouden dus snel moeten wegreageren in de zuurstofrijke atmosfeer van deze planeet. Dat gebeurt inderdaad zodra de organismen afgestorven zijn (tenzij de restanten toevallig in zuurstofloze omstandigheden onder het oppervlak terecht komen). Zolang het organisme echter in leven is, houdt het zichzelf in stand dank zij een onafgebroken inspanning. Nieuwe moleculen worden voortdurend opgebouwd, tegen de genadeloze afbraakwerking van de omgeving in. Onophoudelijk is er de dreiging van chemische aftakeling waartegen dient gestreden.

Leven is stroomopwaarts roeien. Het gaat in tegen de spontane trend, verzet zich en slaat een andere koers in. Leven is daardoor een daad van opstand tegen de natuur. De prijs ervoor is zwaar en moet onafgebroken betaald worden. De chemische abnormaliteit die de organische moleculen van de levende wezens in de oxyderende aardatmosfeer vormen, kan slechts worden gerealiseerd dank zij grootse inspanningen waarbij enorme hoeveelheden energie en materiaal worden verbruikt en op grote schaal afval wordt geproduceerd.

Bij sommige hoger ontwikkelde wezens is het niet-evenwicht tussen lichaam en omgeving niet alleen van chemische maar ook van thermische aard. Vogels en zoogdieren bezitten hun leven lang een temperatuur die hoger is dan die van de omgeving; het zijn eilanden van warmte in een koele lucht. De prijs voor deze thermische abnormaliteit is opnieuw zwaar; het vergt een voortdurende warmteproduktie waardoor de energie uit voedsel en ademhaling verkregen moet worden. Ondanks het spontane, niet te verhinderen warmteverlies mag de temperatuur geen ogenblik zakken. Afkoelen betekent sterven: zoals sterven ook tot afkoelen leidt en

daarbij het evenwicht herstelt. Dood gaan, is de natuur die haar rechten weer opeist.

Naast het chemisch en thermisch niet-evenwicht, bevinden levende wezens zich op vele andere manieren niet in evenwicht met hun omgeving. Doorheen cellen en zenuwbanen lopen elektrische impulsen, voortgestuwd door spanningen die op actieve wijze in stand worden gehouden. Er is daardoor binnen deze cellen geen elektrisch evenwicht. Structureel vormen levende wezens vreemde aberraties van wat, normaal gesproken, onder onvloed van evenwicht en stabiliteit tot stand zou moeten komen. In plaats van homogeen verdeelde, amorfe of kristalsymmetrische configuraties te zijn, bezitten ze een complex en onwaarschijnlijk gevormd lichaam. Er kan geen sprake van zijn dat dergelijke vormen onder evenwichtsomstandigheden spontaan tot stand komen. Evenwicht leidt tot gelijkvormige, gelijkmatige, homogene structuren.

Ecologisch doen en denken

Levende wezens zijn vreemde verschijningen in de natuur. De vaststelling vloeit niet uit menselijk chauvinisme of fantasievolle voorstelling voort, maar uit directe waarneming. De aarde wijkt af van haar buurwerelden. Het leven rukt deze planeet uit haar chemisch evenwicht en woelt het hele milieu op onherroepelijke en grootschalige wijze om. De constatering is wellicht nog onbegrepen, maar zij is in elk geval onweerlegbaar. In het licht daarvan is echter veel van het moderne populair-ecologische denken misleidend.

Een vaak gehoorde uitdrukking is die van het 'natuurlijk evenwicht'. De natuur zou een nauwkeurig uitgebalanceerd systeem zijn dat, zolang het niet door menselijke of andere catastrofes verstoord wordt, in wonderbaarlijk evenwicht verkeert.

Evenwicht treffen we echter, zoals hier besproken, slechts aan waar de dood heerst. Leven is bij uitstek 'niet-evenwicht'. Wat onder natuurlijk evenwicht doorgaans verstaan wordt, is hoogstens een toestand van tijdelijke, min of meer op elkaar afgestemde relaties tussen biologische populaties. Voor de rest is het een mythe. Er is geen reden om 'evenwicht' als zodanig tot een ideaal of streefdoel te verheffen, zelfs niet in haar gereduceerde betekenis. Evenwicht betekent altijd de consolidatie van een bestaande toestand, en is als zodanig het tegendeel van wat leven vertegenwoordigt: activiteit en verandering. Wie evenwicht in de natuur verkiest, kiest de dood boven het leven.

Een ander uitgangspunt van talrijke hedendaagse ecologisch georiën-

teerde gedachtenstromingen is de scheiding die wordt aangelegd tussen de natuur enerzijds, en de artificiële wereld van de mens en zijn technologie anderzijds. Onder natuur wordt dan het geheel verstaan van bodem, water, lucht en leven, dat verondersteld wordt in een delicaat uitgebalanceerd evenwicht te verkeren. De mens zou een uit de band gesprongen stuk natuur zijn, die zich vergrijpt aan deze natuur en het evenwicht ervan gevaarlijk verstoort. Het karikaturale van deze opvatting verklaart misschien de populariteit ervan, maar ontneemt haar in werkelijkheid elke reële overtuigingskracht.

Er kan niet ontkend worden dat de mens in opstand leeft tegen de natuur. Hij ploegt de aarde om, bouwt betonnen landschappen, vindt exotische materialen uit en produceert massale hoeveelheden onbruikbaar geworden stoffen die in de omgeving achtergelaten worden. In plaats van de natuur te aanvaarden zoals zij zich aan hem presenteert, verandert hij haar, vernietigt veel van het bestaande en stelt eigen waarden in de plaats. Dat is een opstand. Maar het is ook een traditie. Het is eigen aan de natuur levensvormen voort te brengen die zich tegen haar keren. De primitieve prokaryoten deden dat toen zij zich drie miljard jaar geleden op grote schaal over de aarde verspreidden en de voorraad organische stoffen verbruikten. De groene planten deden dat toen zij de fotosynthese uitvonden en daarmee uit eigen kracht organische stoffen produceerden, maar tegelijk de hele atmosfeer aantastten met kolossale hoeveelheden afval-zuurstof.

Elk organisme zet zich voor zijn overleving als individu en als soort tegen de natuur af zoals die op dat ogenblik bestaat. In dat opzicht is het gedrag van de mens fundamenteel niet verschillend van dat van andere biologische soorten.

Er wordt beweerd dat de schadelijke activiteiten van de mens kwalitatief verschillend zijn van de ingrepen van dieren of planten op het milieu, omdat ze zo bruusk, omvangrijk en wereldomspannend zijn, en daardoor onherstelbaar. De 'schade' eerder reeds door andere levensvormen verricht was in vele gevallen echter ook catastrofaal voor de bestaande orde, en ook onomkeerbaar. De planten hebben de atmosfeer met de geloosde zuurstof vergiftigd. Latere planten- en diersoorten hebben zich daaraan moeten aanpassen (sommige bacteriën zijn daar nooit in geslaagd en leiden nu een miserabel bestaan in de zuurstofloze omgeving van diepe poelen of als parasieten in het inwendige van andere organismen). Eerder hebben de anaërobe prokaryoten de voorraad organische stoffen op aarde zo goed als uitgeput door hun ongebreidelde groei waardoor alle verdere leven onmogelijk dreigde te worden. Opnieuw hebben latere levensvormen zich aangepast door het ontwikkelen van technieken, zoals fotosynthese, voor eigen produktie van organisch materiaal. Maar

nooit werd de aarde opnieuw wat het 'aards paradijs' van de eerste prokaryoten moet zijn geweest.

Het optreden van de mens op aarde kan daarom niet onnatuurlijk zijn. Het kan enkel tegennatuurlijk worden genoemd in zoverre de natuur zich zelf tegennatuurlijk gedraagt. Het is dit paradoxaal gedrag op aarde dat aan de basis ligt van het hele biologisch verschijnsel op deze planeet. Eerder dan een vernietiger, is de mens door zijn activiteiten een uitbouwer van het leven op aarde.

Vanzelfsprekend zijn de huidige menselijke activiteiten niet een rechtlijnige voortzetting van wat het leven eerder realiseerde. Het zijn wel degelijk nieuwe en unieke gebeurtenissen in de geschiedenis van deze planeet. Nooit eerder kruisten vliegtuigen door de stratosfeer en organiseerden halfgeleider-kristallen zich tot computers. Nooit eerder was de vernietigingskracht van de middelen die worden ingezet om te domineren of te imponeren, zo groot. Dat het optreden van de mens zo verschillend is van wat zich eerder reeds op aarde afspeelde, maakt dat ecologische denkers doorgaans weigeren de maatstaven die gelden voor de andere biologische soorten toe te passen op de mens. Het is in hun visie de mens die de natuur verknoeid heeft en die nu de plicht heeft de schade in te dijken door te beschermen wat overblijft.

Ook al komen uit een dergelijke filosofie praktische suggesties voort voor een waardevol milieu-heilzaam beleid, toch meen ik dat zij in essentie onjuist is. In deze houding kan een nieuwe vorm van een oude kwaal bespeurd worden, hier, ironisch genoeg, vermomd als de remedie ervoor. Antropocentrisme is de kwaal, reïntegratie van de mens in de natuur is de voorgestelde remedie.

De idee dat de mens weer in de natuur dient te worden opgenomen, impliceert dat we er thans buiten zouden staan. In het licht van wat bekend is over het gedrag van andere biologische soorten kan een antropocentrische opvatting in die vorm niet langer aanvaardbaar zijn. Elke nieuwe soort die tijdens de evolutie opdaagde introduceerde een uniek gamma aan activiteiten en gedragingen op aarde. Vooral bij de succesvolle soorten, degenen die zich het opvallendst wisten te manifesteren, was het unieke karakter frappant (en fataal voor de anderen). Vliegtuigen mogen unieke realisaties zijn, maar dat waren vlinders ook, computers bizarre apparaten, maar hersenen niet minder.

Het abnormale van het menselijke maakt slechts deel uit van het normale van het biologische.

De moderne ecologie moet de mens in zijn hoedanigheid van omvormer aanvaarden en daarmee uit het stramien van doemdenken en zelfverwijt stappen. De mens is niet het perverse wezen dat sommigen van hem ophangen, en hij dient zichzelf niet te verontschuldigen voor het nieuwe

dat hij op deze planeet voortbrengt. Ook niet als dat met verdwijning van oudere waarden gepaard zou gaan. Dit is geen pleidooi voor natuurverwoesting; louter zelfbehoud is gebaat bij een omzichtig optreden, en bovendien is een altruïstisch respect voor andere levensvormen één van de waarden die juist door de mens op aarde zijn ingevoerd. Ik denk echter dat we wél hoognodig toe zijn aan een herwaardering van de eigen plaats en rol in de natuur. Liever dan onszelf en onze kultuurprodukten buiten de natuur te plaatsen, dienen we te beseffen dat we een uitgesproken manifestatie van de natuur zijn.

Als er een tweeledigheid bestaat in de opbouw van de wereld, dan is het zeker geen opdeling tussen mens en natuur; misschien eerder tussen leven en niet-leven, of, meer fundamenteel, tussen wat in rust verkeert en wat geen rust kent, tussen evenwicht en niet-evenwicht. Het leven van elk levend wezen, bacterie, plant, dier of mens, is een strijd tegen de anorganische natuur, een strijd die als hij gewonnen wordt, leidt tot vreemde vormen en onvoorspelbare handelingen, die nergens worden aangetroffen waar enkel simpele natuurwetten hun gang gaan. Het is een strijd die schijnbaar alleen op aarde aangegaan wordt, of althans op aarde gewonnen wordt. Is de tweeledigheid in de natuur misschien die van de aarde en het buitenaardse?

Laat ons terugkeren nu naar de kwestie van de niet-evenwichtstoestand van het aards milieu en de rol die het leven daarin speelt. Er bestaan aanwijzingen dat het leven op nog uitgebreider schaal de toestand van de aardatmosfeer in de hand heeft, dan vermoed kan worden enkel op basis van de eerder besproken direct waarneembare ingrepen.

Zuurstof in de atmosfeer

We hebben al gewezen op de abnormale samenstelling van de aardatmosfeer, in het bijzonder op de hoge concentratie aan vrije zuurstof. De combinatie van een biosfeer bestaande uit waterstofrijke koolstofverbindingen, ingebed in een atmosfeer met 21 procent zuurstof, is als een kruitvat; een vonk kan volstaan om een explosieve ontbranding te bekomen. Het gevaar voor een snelle, uit de hand lopende oxydatie van het brandbaar materiaal hangt als een grimmige dreiging in de lucht. Het is bekend hoe in droge omstandigheden kleine oorzaken, zoals een blikseminslag, bos- of steppebranden kunnen doen uitbreken met verwoestende gevolgen. Zou het gehalte aan zuurstof nog iets groter zijn, enkele procenten maar, dan zouden gigantische branden op aarde niet meer te

stuiten zijn, ook niet in vochtige klimaten. De ganse biosfeer zou gevaar lopen ten onder te gaan.

Aangezien de grote hoeveelheid zuurstof in de dampkring een resultaat van de fotosynthese door de planten is, dient het leven zelf verantwoordelijk gesteld voor deze gevaarlijke toestand die haar in haar voortbestaan zou kunnen bedreigen. Gelukkig lijkt de zuurstof-concentratie niet verder te stijgen, ondanks de aanhoudende produktie door de planten. Voor zover metingen kunnen nagaan, handhaaft het zuurstofgehalte zich op een zeer constant niveau. Al vele honderden miljoenen jaren zou dat het geval zijn. Zuurstof wordt blijkbaar weggenomen in exact hetzelfde tempo als waarin het geproduceerd wordt. Het is een gevaarlijk koorddansen want zelfs een minieme stijging heeft fatale gevolgen. Anderzijds zou ook een afname van het zuurstofniveau grote schade voor het leven met zich meebrengen. Voor hun energie-voorziening zijn de meeste hoger ontwikkelde levende wezens, vooral de dieren, op ademhaling aangewezen, een proces dat gebruik maakt van de zuurstof uit de lucht om daarmee op gedoseerde wijze voedsel te verbranden. De vrijgekomen energie kan dan voor eigen gebruik aangewend worden. Indien de hoeveelheid beschikbare zuurstof in de lucht afnam, zouden deze levensvormen onherroepelijk ophouden te bestaan.

Een nauwkeurig gehandhaafde zuurstofconcentratie in de lucht is daarom essentieel voor het leven op aarde, althans in de toestand waarin het thans bestaat. Maar dit constante hoge niveau is een verre van evidente zaak; een atmosfeer in chemisch evenwicht zou vrijwel geen zuurstof bevatten. Op spontane manier kan een gehalte van 21 procent dus niet blijven bestaan, er is daartoe een voortdurende produktie nodig. Langs de andere kant zou een onafgebroken produktie tot een onafgebroken stijging leiden, en dient er dus in gelijke mate ook weer zuurstof uit de atmosfeer onttrokken te worden. Hoe kan een planeet een dergelijke delicate opdracht uitvoeren?

Het leven zelf grijpt daartoe in en regelt het zuurstofniveau op een voor zichzelf meest geschikte waarde. De produktie van zuurstof door fotosynthese wordt voortdurend gecompenseerd door ademhaling en door verrotting van afgestorven organismen. Bij dit laatste proces komt, zoals besproken, methaan vrij dat snel oxydeert in de atmosfeer. Het kleine methaangehalte in de lucht heeft daardoor een uitermate belangrijke rol te vervullen: het draagt bij tot de instandhouding van het zuurstofgehalte.

Het is op dit ogenblik niet duidelijk op welke wijze de levensprocessen op aarde zo gecoördineerd te werk kunnen gaan dat deze regeling secuur en feilloos verloopt. De nauwkeurigheid waarmee het niveau zich gedurende zo lange tijd heeft ingesteld, ondanks allerlei geologische wis-

selvalligheden, sluit toevalligheid uit. Er moeten mechanismen werkzaam zijn die de omstandigheden binnen het aardse milieu actief regelen en bijsturen, als een cybernetisch systeem onder invloed van terugkoppelingseffecten. Om globale schommelingen te voorkomen, moeten de regulerende reacties bovendien zeer nauwkeurig afgesteld zijn. Ook dienen ze lokaal te opereren, zodat ze enkel daar ingrijpen waar de corrigerende ingreep nodig is, vooraleer de afwijkingen zich op grote schaal manifesteren.

Overproduktie van zuurstof in de atmosfeer moet de oxydatieprocessen versnellen waardoor weer meer zuurstof uit de atmosfeer wordt weggenomen en het peil gehandhaafd kan blijven. Overdreven verbruik van zuurstof moet dan door stimulering van de biologische activiteit de aanmaak ervan opdrijven. In alle gevallen moeten de reacties adequaat en zonder uitstel worden uitgevoerd.

Wat ook de mechanismen zijn, het leven zelf neemt hier blijkbaar het eigen lot actief en doelgericht in handen.

Zelfregulatie van een planeet

Volgens Jim Lovelock, auteur van het inspirerende boek 'Gaia, a new look at life on earth' (1979), omvat de zelfregulatie van leven en milieu op aarde meer dan alleen de controle van het zuurstofgehalte. Lovelock vat het geheel van lucht, water, bodem en organische materie op als bestanddelen van een wereldomspannend 'super-organisme' dat zoals elk organisme op samenhangende wijze functioneert, zichzelf voedt en in stand houdt. Gaia, noemt hij dit super-organisme naar de Griekse godin van de aarde.

Gaia is een verbazingwekkend en complex systeem. Het meest verbazingwekkende is dat zij op doelgerichte, haast zelfbewuste manier lijkt te functioneren. Door toevallig of blind optreden zou nooit een efficiënte en een adequate wijze van ingrijpen bekomen kunnen worden als wordt vastgesteld. Lovelock stipt aan dat meer kenmerken van het aardse milieu op tot nog toe onverklaarbare wijze in de loop van de geologische geschiedenis constant gebleven zijn ondanks soms sterk veranderende uitwendige omstandigheden. De standvastigheid was daarbij telkens van vitaal belang voor het leven en moet zeer nauwkeurig gehandhaafd geweest zijn.

De temperatuur van het aardoppervlak is een treffend voorbeeld. We hebben besproken hoe deze temperatuur tot stand komt als gevolg van een evenwicht tussen opwarming door het zonnelicht en eigen infra-rood uitstraling van de aarde. Er doen zich hierbij echter enkele complicaties

voor die tot gevolg hebben dat dit evenwicht een onstabiel karakter moet bezitten. De gevolgen van een eventuele temperatuursverandering op aarde werken namelijk op zodanige manier, dat zij deze verandering eerder versterken dan afzwakken.

Indien zich door een of andere oorzaak een globale temperatuurdaling op aarde zou voordoen, neemt de bedekking van het aardoppervlak met sneeuw en ijs toe. Door de witte kleur kaatst het oppervlak dan aanzienlijk meer zonnelicht terug de ruimte in zonder dat dit tot de opwarming van de grond bijdraagt. Minder zonnelicht wordt dus geabsorbeerd en de temperatuur daalt verder. Een uitbreiding van de ijslagen moet het gevolg zijn, wat weer verdere afkoeling veroorzaakt. Ook voor een eventuele temperatuurstijging is een dergelijke 'verkeerde' reactie te verwachten. Door de hogere temperatuur verdampt meer water en neemt de globale vochtigheidsgraad van de atmosfeer toe. Hierdoor kan de infrarode straling die de warmte van de aarde moet afvoeren moeilijker ontsnappen, want waterdamp is niet transparant voor deze straling. Als gevolg hiervan stapelt de warmte in de onderste atmosfeerlagen zich op en de temperatuur stijgt. Hierdoor zal nog meer water verwarmen wat de temperatuur weer verder doet oplopen. Dit gaat zo door en de temperatuur stijgt alsmaar. In beide richtingen moet de temperatuur op aarde zich onstabiel gedragen; elke globale storing van de temperatuur (niet noodzakelijk lokale variaties) dreigt uit de hand te lopen en tot een verregaande afkoeling of opwarming te leiden.

Het lijkt logisch dat in dergelijke omstandigheden de temperatuur op aarde een extreme waarde moet aannemen; hetzij erg koud — de hele aarde ingesneeuwd en bevroren —, hetzij zeer warm. Onvermijdelijk komen Mars en Venus in herinnering. Is de eerste soms een ingevroren wereld, met al het water in poolkappen en permafrost-lagen? Is Venus misschien het andere uiterste, waarbij de hogere temperatuur volledig uit de hand liep? Het ziet er inderdaad naar uit dat dit zo is.

Venus moet door haar dichtere stand bij de zon van bij het begin een iets hogere oppervlakte-temperatuur hebben gekend dan de aarde. Dit zou het water meer hebben verdampt waardoor de temperatuur verder steeg. In de broeikas die de Venus-atmosfeer op die manier werd, verdampte uiteindelijk al het water zodat geen zeeën of oceanen overbleven. Ook andere bestanddelen, zoals carbonaten in de rotsgesteenten van de bodem, ontbonden onder invloed van de hoge temperatuur. Het daarbij vrijkomende koolstofdioxyde is zoals waterdamp infrarood-absorberend en draagt dus bij tot een verdere temperatuurstijging. De toestand liep daardoor helemaal uit de hand. Venus werd gloeiend heet. Ondertussen verdween de waterdamp wel geleidelijk uit de atmosfeer door fotolytische ontbinding, maar de koolstofdioxyde stapelde zich steeds verder op en

verhoogde verder het broeikaseffect. Het eindresultaat is bekend: een dichte, verzengend hete dampkring van hoofdzakelijk koolstofdioxyde.

Mars moet met zijn aanvankelijk wat lagere temperatuur als gevolg van de grotere afstand tot de zon, een tegengesteld lot gekend hebben. Het water aan het oppervlak van deze planeet bevroor. Het felwitte ijs en het verminderd broeikaseffect deden de temperatuur verder dalen. Het werd op deze planeet nooit behoorlijk warm. Het koolstofdioxyde van de ijle atmosfeer is niet bij machte genoeg warmte vast te houden om merkbare verandering in deze toestand te brengen.

De aarde ligt als een klein wonder tussen beide uitersten in. Hoe speelt onze planeet het klaar haar milde temperatuur te behouden? Waarom valt zij niet in ofwel de Marsiaanse, ofwel de Venusiaanse put?

Het is bekend dat zich in het verleden ijstijden op aarde hebben voorgedaan, waarbij zich vrij spectaculaire klimaatsveranderingen voordeden. Helemaal schijnt de aarde er dus niet in te slagen haar temperatuur op peil te houden. Toch is de gemiddelde temperatuurdaling tijdens deze ijstijden niet zeer groot geweest, hoogstens enkele graden Celsius. Het effect dat veroorzaakt wordt door het groot lichtweerkaatsend vermogen van sneeuw en ijs zou er wel hebben toe bijgedragen dat de aarde zich slechts met grote moeite uit de greep van het barre klimaat herstelde, maar uiteindelijk keerde telkens het normale regime terug.

Van grotere betekenis dan deze tijdelijke en eerder zeldzame ijstijdperioden is dat de temperatuur op aarde de laatste miljarden jaren essentieel constant gebleven is. Dit is zeer verwonderlijk omdat we weten dat de zonnestraling zeker niet constant was.

Uit sterevolutie-berekeningen volgt dat de uitstraling van de zon geleidelijk toeneemt. Sinds het ontstaan van het leven op aarde, ongeveer drie en een half miljard jaar geleden, moet de intensiteit van het zonnelicht met ongeveer dertig procent zijn toegenomen. Er kan uitgerekend worden wat de temperatuur op de jonge aarde geweest moet zijn onder invloed van de zwakkere zonnestraling van toen, aannemend dat de omstandigheden voor het overige aan de huidige gelijk waren. Uit deze berekeningen blijkt dat tot ongeveer twee miljard jaar geleden het hele aardoppervlak een temperatuur onder het vriespunt van zeewater moet hebben gekend. We weten nochtans dat het in werkelijkheid niet zo koud geweest kan zijn. Twee tot drie miljard jaar geleden bevonden zich reeds fotosynthese-bedrijvende organismen in het water, die onmogelijk onder een ijslaag geleefd kunnen hebben. Uit tal van paleontologische gegevens kan afgeleid worden dat in het verleden de gemiddelde temperatuur op aarde nooit drastisch verschillend was van de huidige, en zeker kunnen geen verschillen opgetreden zijn als verwacht zou kunnen worden op basis van de veranderende zonne-intensiteit.

Andere aanpassingen moeten zich daarom hebben voorgedaan die een compensatie voor de zonnestraling opleverden. Een wijziging in de infrarood-doorlaatbaarheid van de aardatmosfeer bijvoorbeeld, of een verandering in het lichtweerkaatsende vermogen van het aardoppervlak zouden dit kunnen bewerkstelligen. Lovelock suggereert dat deze wijzigingen in de kenmerken van het milieu op aarde niet toevallig zo uitkwamen dat de temperatuur er door gestabiliseerd wordt. Dit kan niet anders gebeurd zijn dan door gecontroleerde bijsturing. Het moet het leven zelf zijn, betoogt hij, dat dit voor haar zo vitale kenmerk zelf onder controle houdt.

Verschillende invloeden van het leven op de globale kenmerken van de aarde zouden het beoogde resultaat tot stand kunnen brengen. A.J. Meadows heeft voorgesteld dat het oppervlak van de primitieve aarde donkerder van kleur was dan tegenwoordig, waardoor het beter de zonnestraling absorbeerde zodat toch eenzelfde temperatuur bekomen kon worden ondanks de zwakkere zon. Door veranderingen in uitbreiding of kleur van de vegetatie op het landoppervlak zou het lichtweerkaatsend vermogen van de aarde zo aangepast kunnen worden als nodig voor de temperatuurregulatie. Geleidelijk aan zou de aarde op die manier helderder van kleur geworden moeten zijn. Carl Sagan en George Mullen hebben daarentegen voorgesteld dat de chemische samenstelling van de atmosfeer in de loop der tijden zo veranderd is dat eenzelfde effect werd bekomen. Zij menen dat de biosfeer zich aangepast heeft door het ammoniak, dat zich aanvankelijk samen met andere waterstofrijke verbindingen overvloedig in de atmosfeer bevond, als voedsel te gebruiken en het daarbij chemisch af te breken. Ammoniak absorbeert infrarode straling, zodat de dalende concentratie ervan in de atmosfeer het vermogen van de aarde haar warmte uit te stralen geleidelijk aan verbeterde, wat voor de intenser wordende zonnestraling zou hebben gecompenseerd.

Als deze effecten inderdaad gewerkt hebben en de aarde op die wijze 'gethermostatiseerd' werd, dan heeft het er veel van weg dat de biosfeer zich in haar geheel gedraagt als een samenhangend macro-organisme dat zichzelf op actieve wijze beschermt. Maar het is dan nog niet duidelijk op welke wijze die besturing gebeurt. Hoe is de biosfeer op de hoogte van de maatregelen die genomen moeten worden om het dreigende gevaar van een oplopende temperatuur af te wenden? Op welke wijze worden de instructies aan fauna en flora meegedeeld?

Mysteries hangen rond de Gaia-hypothese. De biosfeer lijkt als een warmbloedig dier in staat haar lichaam op constante temperatuur te houden, wat ook de buiten-omstandigheden zijn. Begrepen is dit vermogen echter allerminst.

Lovelock meent dat de actieve ingrepen van Gaia op het aards milieu

meer omvatten dan alleen temperatuur en zuurstofgehalte van de atmosfeer. Hij wijst op andere belangrijke constanten in de aardse geschiedenis, zoals het zoutgehalte van de oceanen en de zuurtegraad van het water. Ook hier staan vitale belangen op het spel. En ook hier lijken louter a-biologische processen niet in staat de noodzakelijke bestendigheid te garanderen. Rivieren op de continenten voeren onophoudelijk mineralen naar de oceanen, waardoor deze geleidelijk aan steeds meer zout moeten bevatten. Eenvoudige berekeningen geven aan dat de oceanen op deze manier reeds lang volledig verzadigd dienen te zijn aan zout. Toch bedraagt het gemiddelde zoutgehalte van de oceanen niet meer dan 3.4 procent, slechts ongeveer één tiende van wat een verzadigde oplossing bevat. Er moet daarom ook zout uit de oceanen worden afgevoerd.

Bekende geologische processen lijken niet in staat dit tegen voldoende tempo te doen. Voor het leven zouden oceanen verzadigd van zout echter fataal zijn. In een dergelijk geconcentreerd milieu zou geen protoplasma in staat zijn de eigen water-inhoud vast te houden. Door osmose wordt het water onverbiddelijk naar buiten gezogen met een zekere dood van de cel tot gevolg. Volgens Lovelock heeft het leven daarom zelf de zoutregulatie van de oceanen in handen genomen. Mariene microorganismen, zoals diatomeeën en radiolariën, nemen voortdurend mineralen in hun harde glasachtige schalen op. Bij het afsterven vergaan deze schalen niet maar zakken naar de bodem van de zee waar zij begraven worden en diepe sedimentlagen vormen. Op die wijze worden mineralen, en dus zout, aan het zeewater onttrokken. Gaia zou het daarbij zo aan boord leggen dat het zoutgehalte op een voor het leven optimale waarde gestabiliseerd wordt.

Ook de zuurtegraad van de aardbodem heeft het leven, volgens Lovelock, onder controle. Zonder ingrijpen zou het milieu op aarde door de zuurstofrijke atmosfeer onvermijdelijk steeds zuurder worden omdat door oxydatiereacties zuren worden geproduceerd. Verbranding van koolstof levert koolstofdioxyde op, dat met water koolzuur geeft. Op dezelfde wijze vormt oxydatie van zwavel en stikstof in de aanwezigheid van water respectievelijk zwavelzuur en salpeterzuur. Onder invloed van een te hoog gehalte aan zuren in het milieu zouden de biochemische processen op aarde ernstig bedreigd kunnen worden. Als bij mirakel echter produceren deze zelfde levensprocessen voortdurend ammoniak dat zij in de atmosfeer lozen. Dit ammoniak (destijds door onze waarnemer op Mars gedetecteerd) is een base, die de werking van de zuren chemisch neutraliseert.

Of Gaia bestaat als intelligent, bewust, planeet-omspannend macro-organisme, of slechts als metaforische omschrijving van het vermogen van deze planeet om haar eigen hoedanigheid te bewaren, het feit bestaat dat controle-mechanismen werkzaam zijn waarvan de werking goeddeels onbegrepen blijft maar waarvan het resultaat niet meer in twijfel staat. Het milieu op aarde wordt op niet-evidente, niet toevallige manier in stand gehouden, alsof iemand met vastberadenheid de touwtjes in handen houdt.

Het geloof in een fragiele, kwetsbare biosfeer is daardoor niet vol te houden. Op meer dan overtuigende wijze heeft de aarde in het verleden bewezen storingen van interne en externe oorsprong te kunnen opvangen. Ook daarom al lijkt een ecologie gebaseerd op ondergangsideeën misplaatst. Menselijke ingrepen mogen het milieu dan wel omvormen, de biosfeer ontwrichten of verwoesten doen zij zeker niet.

Toch leiden al deze standvastigheid en zelfbeheersing niet tot een star status quo van de bestaande toestand. Integendeel, de eerst gediende en vermoedelijke uitvoerder van het grootse plan, het leven op aarde, is zelf een grote variabele. Het leven heeft van de miljarden jaren constante temperatuur, zoutgehalte, zuurtegraad, geprofiteerd om een evolutie door te maken die haar onherkenbaar heeft getransformeerd, van slijmerig protoplasma tot mens. Deze ontwikkeling was meer dan een geniale metamorfose van een kleine dosis aardmateriaal, het was de uitvoering met vastberadenheid en intentie van een collectieve onderneming door bodem, water en lucht van deze planeet.

Het constante karakter van het aardse milieu mag niet opgevat worden als de uiting van een planetair natuurlijk evenwicht. Het is er het tegendeel van. Wat op aarde in stand wordt gehouden, is de toestand van chemisch niet-evenwicht. Alle elementen van Gaia werken samen om te beletten dat het fatale evenwicht, de dood, zijn intrede zou doen.

Het niet-evenwicht van de aarde is zeker niet een normale situatie voor een planeet, en het is ook niet een voorbijgaande afwijking van het normale patroon. Het is de toestand van een planeet in de greep van een omwenteling, een georganiseerde opstand die zichzelf stuurt en ondertussen groeit en evolueert en steeds verder om zich heen slaat.

De natuurwetten moeten zich op deze planeet misbruikt voelen. Hoewel een permanent niet-evenwicht tot op zekere hoogte geduld wordt zolang sterrestraling de kosmische ruimte niet heeft gevuld, maakt de aarde misbruik van deze algemene omstandigheid door zich te verzetten tegen elke spontane neiging om tot rust te komen. Zij maakt, dwars tegen

het normale gedrag van de natuurwetten in, het niet-evenwicht meer geraffineerd, meer complex en meer stabiel.

7

Materie in rust, materie in leven

De natuur gedraagt zich anders in een levend wezen dan in de niet-levende wereld. Vrijheid komt in de plaats van wetmatigheid. Is er hoop dat we dit ooit zullen begrijpen?

Wat zich op aarde afspeelt, is nieuw. Vergelijkbare taferelen worden op geen andere plaats aangetroffen. De aarde is uniek. Maar vooral is wat hier plaatsgrijpt nieuw, omdat het uit het niets ontstaat op het ogenblik zelf dat het gebeurt. Het komt als authentieke schepping te voorschijn uit wat voordien niet bestond. Wat het leven uitricht, vloeit niet voort uit natuurwetten, het wordt gecreëerd. Het wordt uitgedacht. Of geïmproviseerd. Het spel van tjilpende mussen boven het gras is niet opgelegd door natuurkundige wetten, het is een uiting van het leven, ontsproten uit ingevingen die de mussen in zichzelf vinden. Het is spontane creativiteit.

Spontaneïteit is belangrijker op aarde dan wetmatigheid, althans voor wie meer waarde hecht aan het gespeel van een mus dan aan de zekerheid van zon en maan. Maar spontaneïteit en creativiteit tarten elke verklaring. Wetenschap heeft er geen vat op. De wetmatigheden van de natuurkunde bieden geen ruimte voor grilligheden zonder oorsprong of noodzaak.

Uit eigen beweging

Het leven leeft uit eigen beweging. Het is gestuwd door zichzelf en hernieuwt zichzelf. Het vindt zichzelf uit. Is er dan wel een uitwendige verklaring mogelijk? Of nodig?

Planten en dieren dragen in de eigen genen wat ze zelf zijn en kiezen uit eigen ingeving wat ze zelf doen. In het bewustzijn dat zich in de meest ontwikkelde dieren ontwikkeld heeft, denkt de materie van deze planeet na over zichzelf. En uit die gedachten groeien nieuwe initiatieven. Maar het leven put ook kracht uit de omgeving en geeft veel aan de omgeving

terug. Door zijn onafgebroken, allesomspannende activiteiten transformeert het de wereld om zich heen en drukt er een onuitwisbare stempel op. Het milieu waarin de organismen op aarde leven, is deel van het leven. Er zijn geen grenzen aan wat het leven zich toeëigent. Wie zou beperkingen opleggen?

Het hele proces is extravagant, verspillend, gevaarlijk en tragisch soms. Zon, water en lucht zijn de materiële elementen nodig om het aan de gang te houden. Zij vormen deel van het systeem, maar zijn er niet het plan van. Wat is het plan? Is er een doel? Buiten de wil niet toe te geven aan de dwang van de natuurwetten blijft alles onuitgesproken.

Een verklaring voor wat het leven op aarde uitvoert, zou, als ze bestaat, een richtlijn kunnen inhouden voor hoe het verder moet. Nu de vrijheid en scheppingskracht die eigen zijn aan het leven zich zo sterk in de mens hebben geconcentreerd, vinden we onszelf voor de vraag geplaatst, in welke richting gevaren moet worden. Welke ingevingen moeten onze daden sturen? De innerlijke impulsen zijn verward, veelvuldig en soms tegenstrijdig. Wordt er ons, vanuit de biologische werkelijkheid die we zijn, een gedragscode voorgeschreven? Of dient ook die te worden uitgevonden door wie ze zal uitvoeren?

Een verklaring, of ten minste een adequate omschrijving van het verschijnsel van het leven, van de biosfeer en van de mens zou ons nog op een andere manier kunnen geruststellen. Met de aanwijzing van de aarde als vreemd object in het heelal of, meer in het bijzonder, met de ontmaskering van het leven als opstandig verschijnsel in een overigens wetmatig heelal, voelen we ons vreemd, misschien zelfs schuldig, in een wereld waar we thuis horen te zijn. Is er geen weg terug, een weg die ons weer opneemt als authentiek deel van het geheel? Een weg die gemoedsrust brengt in plaats van angst, en zelfrespect in plaats van zelfverwijt? Een beter begrip van het vreemde verschijnsel dat het leven is, zou die weg misschien kunnen wijzen.

Het onvatbare leven

Misschien is er meer dan één weg naar dit doel. We zouden van meet af aan kunnen afzien van elke poging het onvatbare te vatten. We zouden het leven op aarde kunnen beschouwen als een voorval dat wezenlijk door vrijheid en onvoorspelbaarheid bepaald wordt. Leven zou inherent onbegrijpbaar kunnen zijn want niet terug te voeren tot wel te omschrijven regels. Dit is een weg die verder geen beroep doet op de wetenschap, althans niet op de wetenschap in haar klassieke gedaante, die de natuur formuleert in wetten en oorzakelijke relaties.

Zelfs zonder terug te vallen op ouderwetse vitalistische theorieën wordt dan aanvaard dat het niet-deterministische karakter van het leven elk wetenschappelijk begrip ervan uitsluit. De wetenschappelijke methode is slechts van toepassing op voorspelbare verschijnselen. Leven beantwoordt daar niet aan en kan daarom niet het onderwerp zijn van wetenschappelijk onderzoek. Wat de biologische wetenschappen bestuderen, zijn de onderliggende mechanismen, niet de essentiële drijfveren van het leven. Biochemie, fysiologie en genetica hebben veel kennis verzameld over het functioneren van de organismen maar deze informatie, hoe interessant ook, verklaart het wezen zelf van het leven niet, evenmin als akoestiek en trillingsleer de symfonieën van Beethoven verklaren. Wetenschap bestudeert de vorm, maar mist de inhoud.

Wetenschap, kortom, faalt hier. Deze conclusie moet in verband gebracht worden met de houding die de wetenschap in het algemeen tegenover de uitwendige werkelijkheid aanneemt, een houding die in haar uitgangspunten fundamenteel niet eerlijk is. De wetenschap stelt dat zij de natuur objectief en onbevooroordeeld benadert. Geen enkele theorie mag bekende feiten over het hoofd zien die op de elementen van deze theorie betrekking hebben. Dat is het standpunt, en daarop berust de wetenschappelijke methode. Maar dat belette Laplace niet te beweren dat de wetenschap in principe in staat is de evolutie van het heelal in verleden en toekomst te berekenen uitgaande van de toestand waarin het op een gegeven ogenblik verkeert. Toch moet ook hij de vlinders in het gras bemerkt hebben, en de politieke wisselvalligheden in Parijs.

Laplace's groteske bewering staat niet alleen. Op alle domeinen selecteert de wetenschap de feiten en reduceert zij de werkelijkheid tot een schema. Van de bewegingen van de planeten rond de zon of de chemische mechanismen in een biologische cel wordt in detail rekenschap gegeven, maar de doelgerichte handelingen, de onberekenbare eigenzinnigheid en spontaneïteit van het leven worden over het hoofd gezien of als illusies afgewimpeld. Op basis van die houding komt de wetenschap tot het besluit dat er in de natuur een strikte oorzakelijkheid moet heersen, dat er in natuurkundige theorieën geen plaats moet zijn voor doelgerichtheid in de verschijnselen, laat staan voor romantische waarden, als schoonheid bijvoorbeeld, of liefde, of metafysische angst...

Dat ieder van ons, wetenschapsmensen inbegrepen, dagelijks het tegendeel ervaren, is de tragiek en de schande van een wetenschap die er niet in slaagt te overtuigen waarom de ene waarneming wel en de andere niet telt. Het consequent volhouden van deze houding heeft mee geleid tot de grote kloof die thans bestaat tussen het wetenschappelijk denken enerzijds, en het artistiek, humaan en religieus denken anderzijds.

Als we de wetenschappelijke methode niet langer vertrouwen, welke

dan wel? Bevrijd van de verplichting voor alles een strikte samenhang en oorzaak te moeten aannemen, openen zich nieuwe mogelijkheden. We kunnen een beroep doen op een hogere scheppende kracht die uit eigen beweging en volgens eigen inzicht aan de natuur kan toevoegen wat niet door de primaire natuurwetten voortgebracht wordt.

Is het leven op aarde het resultaat van een bijzondere ingreep? Misschien vinden we in het bestaan van levende wezens op deze planeet de wil terug van een Schepper die geen voldoening vond in een heelal van enkel sterren, steen en ijs. Hij zou vrijheid en bewustzijn kunnen hebben toegevoegd, wellicht gekoppeld aan de opdracht het heelal met eigen gekozen waarden te verrijken. Wat we de doelgerichte handelingen van het leven noemen, zouden uitingen kunnen zijn van het plan dat ter verwezenlijking werd meegegeven. De waarheid over onze bestemming moet dan door de auteur zelf van het plan geopenbaard worden.

De hypothese is volledig ad hoc en niet strikt te weerleggen zodat zij eigenlijk helemaal geen hypothese is, maar een geloof. Als verklaring voor de waarneembare werkelijkheid, is deze opvatting in strijd met geen enkel gegeven. In dat opzicht heeft zij meer verdienste dan vele gangbare wetenschappelijke opvattingen.

Als uit het niets en zonder oorzaak duikt plots het beeld van een knoestige boom op. De schors van de dikke stam is ruw en verweerd maar de boom is gezond en levenskrachtig. Roodgele peren hangen verdoken tussen de bladeren. Onder de boom staat een houten bankje. De latten van zitting en rugleuning zijn afgeschilferd en de metalen armsteunen verroest. Het is vreemd hoe de mens in dit stukje wereld moet ingrijpen. Alleen regelmatig onderhoud voorkomt dat het bankje roest en het hout rot. Anderzijds heeft de boom niemand nodig om er jarenlang gezond bij te staan en vruchten te produceren. Roesten en groeien zijn tegengestelde trends die hier allebei spontaan optreden.

Er is in zeker opzicht niet veel verschil tussen het bankje en de boom. Beide staan in de grond ingeplant. Ze voeren niet veel uit. In de winter is de overeenkomst het grootst: het zijn dan niet veel meer dan houten skeletten. In de zomer is de boom groen geworden, het bankje glimt alleen maar in de zon. Later presenteert de boom het resultaat van een seizoen stille vastberadenheid: kleurige peren door het hout voortgebracht. Het bankje staat er sprakeloos bij, de verf verlept.

Verruiming van het gedachtengoed

Er moet nog een weg bestaan die leidt naar begrip van het verschijnsel leven. Ik weet niet of een aankomst mogelijk is. Ik weet niet waar we

eventueel zullen uitkomen. Ik weet ook niet of we uiteindelijk niet zullen belanden waar we eerder reeds vertoefden, bij het geloof dat een bovennatuurlijk ingrijpen het leven voortdrijft. Maar het uitgangspunt is anders.

Het is een weg die het vertrouwen in de wetenschap niet verliest, althans niet in principe. De hoop wordt overeind gehouden dat, ondanks alles, het mogelijk is aan te geven hoe het onvatbare van het leven uit het wetmatige van de natuur kan zijn voortgekomen. Alles wel beschouwd, zou een inzicht dat gebaseerd is of voortbouwt op wetenschappelijke kennis die reeds bestaat tot de meeste voldoening stemmen. Veel van het functioneren van de natuur is immers reeds begrepen; deze kennis verwerpen of onbenut laten, zou een vergissing kunnen zijn. Het leven zelf maakt in ieder geval volop gebruik van de welbegrepen wetten van de natuurkunde, over wat voor extra troeven het ook nog moge beschikken. Zou dan een wetenschap die vollediger en eerlijker is dan de traditionele, toch geen vooruitzichten bieden?

Wat de boom uitvoert en wat het bankje overkomt, staat in schril contrast. Het zijn echter in beide gevallen processen waarvan de details op basis van moderne chemie grotendeels begrepen zijn. Het bankje ondergaat oxydatie en verwering, wat goed begrepen processen zijn. De boom voert complexe maar geen onbegrijpelijke taken uit: fotosynthese en eiwitproduktie zijn grondig bestudeerde processen. Kan de wetenschap dan ook vertellen waarom beide systemen, het bankje en de boom, zo verschillend te werk gingen?

Het kan wat het bankje betreft; het antwoord is zelfs triviaal. De interne structuren en mechanismen die opbouwend werk zouden moeten uitvoeren, ontbreken in zijn schamele constructie. Nooit kunnen afgezaagde houten planken met schroeven bijeen gehouden, rijpe vruchten voortbrengen. De boom bezit een meer complexe structuur. Die beschikt over protoplasma binnen de houtvezels en chlorofyl in zijn weefsels. Binnen de cellen zitten de nodige informatie en middelen om het werk te klaren.

De vraag blijft dan, hoe die informatie en structuur tot stand kwamen. En ook waarom de boom niet hetzelfde lot als het bankje ondergaat. Waarom vermolmt, verrot en vergaat hij niet? Ook op deze knoestige houten stam werken de slopende grillen van weer en wind in. Het gebeurt uiteindelijk wèl, weten we; de boom wòrdt geveld, maar waarom kan hij uitstellen wat onmiddellijk zou moeten gebeuren?

De wetenschap heeft in de loop van haar ontwikkeling niet slechts haar kennisdomein uitgebreid, maar ook haar opvattingen herzien, drastisch soms, en herhaaldelijk indien nodig. De zelftwijfel waarvan verwacht zou kunnen worden dat hij gepaard gaat met de vele doorstane

crisissen, steekt schril af tegen de zelfvoldane zekerheid die de wetenschap doorgaans uitstraalt. Maar misschien is een zekere zelfverzekerdheid toch niet helemaal ten onrechte, want juist haar vermogen tot zelfkritiek en opnieuw starten zou meer hoop kunnen bieden om het uiteindelijke doel te bereiken dan met een onfeilbare en starre gang mogelijk zou zijn. Hierin zit zelfs de enige hoop de essentie van het levensverschijnsel ooit in het wetenschappelijke denkpatroon op te kunnen nemen.

Aanvankelijk waren de wetenschappelijke methoden en uitspraken enkel van toepassing op verschijnselen die zich strikt wetmatig gedragen, de bewegingen van de hemellichamen bijvoorbeeld, of de voortplanting van licht door lenzen, of het verloop van een chemische reactie. Voor deze verschijnselen vond men via proefondervindelijke weg en door theoretische afleiding wetten die toelieten het verloop ervan te berekenen, in principe met oneindige nauwkeurigheid. Onder invloed van de successen die door de newtoniaanse fysica op deze wijze behaald werden, ontstond het ideaal van een in essentie eenvoudige kosmos, perfect beschrijfbaar door enkele simpele en algemeen geldende wetten. James Thomson beschreef in 1727 het ideaal van de wetenschap in enkele treffende woorden (uit 'To the Memory of Sir Isaac Newton'):

> [Newton] from motion's simple laws
> Could trace the secret hand of Providence,
> Wide-working through this universal frame.(*)

De waargenomen complexiteit en onvoorspelbaarheid van de natuur werden opgevat als niet essentieel, enkel het gevolg van een nog niet begrepen onderliggende eenvoud. Men zag juist als doel van de wetenschap die eenvoud te ontdekken. Behalve fundamenteel eenvoudig, was de natuur ook een perfect lopende machine. Afwijkingen van de natuurwetten konden niet voorkomen. Waar een afwijking werd vastgesteld, betekende dit dat de aangenomen natuurwet onjuist was; een nieuwe wet, die wèl in staat is het waargenomen gedrag exact te beschrijven, diende dan gezocht. Na de successen van de hemelmechanica meende men in de achttiende eeuw echter dat de correcte universele wetten gevonden waren. Hierop was het absolute determinisme van Laplace gebaseerd, zoals hij het in 1814 formuleerde: 'We moeten de huidige toestand van het heelal opvatten als het resultaat van de voorgaande toestand en als oorzaak van wat zal volgen. Een intelligent wezen dat op een gegeven ogenblik alle

(*) [Newton] kon uit de eenvoudige bewegingswetten
De verborgen hand der Voorzienigheid volgen,
Alom werkzaam in het wereldstelsel.

krachten en alle bestanddelen van de natuur zou kennen, zou in staat zijn de beweging van zowel de grootste voorwerpen als het miniemste atoom met behulp van éénzelfde formule te beschrijven. Niets zou nog onzeker zijn voor dit wezen, en van zowel de toekomst als het verleden zou hij kennis hebben.' (Essai philosophique sur les Probabilités).

In de loop van de negentiende eeuw nam de wetenchap nochtans, onder meer onder impuls van Laplace zelf, nieuwe concepten in zich op, abstracter meestal en subtieler vooral, zoals het begrip kans. De waarschijnlijkheid van een verschijnsel werd een belangrijk begrip. Statistische methoden deden hun intrede. Wat niet als individueel verschijnsel exact berekend kon worden, kon het nog wel als verzameling. Het gedrag van een gas bijvoorbeeld, bleek op die manier toch begrepen te kunnen worden en zelfs exact berekend, ook al bleef men in het onzekere over de moleculaire gebeurtenissen die aan de basis ervan liggen. Waar de lotgevallen van één molecule niet berekend konden worden, was dat wel mogelijk met 10^{23} of meer moleculen.

Hoewel men met deze werkwijze de ambitie liet varen elk detail van het heelal te berekenen, bleef de wetenschap in principe even strikt deterministisch. De onmogelijkheid gedetailleerde kennis van macroscopische natuurkundige systemen te verwerven werd opgevat als van louter praktische aard. Dat de wetenschap het determinisme niet van zich af kan schudden maar daardoor wel in moeilijkheden komt, werd scherp aangevoeld door Poincaré: 'Het is evenmin mogelijk niet als een vrije mens te handelen wanneer men een daad stelt, als niet als een determinist te redeneren wanneer men wetenschap bedrijft.' (Dernières pensées, 1912).

In het begin van deze eeuw brak dan toch plots het inzicht door dat de onzekerheid ten aanzien van een natuurkundige toestand niet noodzakelijk een weerspiegeling is van een tekort aan kennis van onzentwege, maar dat zij inherent kan zijn aan het wezen van het object. De radioactiviteit van een atoomkern bijvoorbeeld, bezit een fundamenteel onbepaald gedrag. Hoewel de waarschijnlijkheid van een desintegratie van de kern gedurende een zeker tijdsbestek nauwkeurig bekend kan zijn, valt over het exacte tijdstip van de gebeurtenis niets te zeggen. Een voorspelling is niet enkel praktisch, maar ook in theorie volstrekt uitgesloten. Onzekerheid en waarschijnlijkheid werden daarmee wezenlijke eigenschappen van de natuur, in plaats van onvolkomenheden in een theorie.

De omwenteling in het natuurwetenschappelijk denken was zo groot dat belangrijke namen, die nochtans bijgedragen hadden aan de ontwikkeling ervan, er nooit toe kwamen de nieuwe inzichten te aanvaarden. Albert Einstein zou volgens zijn biograaf C. Seeling gezegd hebben: 'Ik zou me, indien nodig, nog wel kunnen voorstellen dat de goede God een wereld geschapen zou hebben zonder natuurwetten, een wereld van en-

kel chaos. Maar dat er een wereld zou bestaan, geregeerd door statistische wetten, een wereld waarin de goede God voor elke individuele gebeurtenis dobbelstenen moet gooien, dat vind ik een zeer verwerpelijke gedachte'. Einstein gaf zijn diepe afkeer te kennen voor de nieuwe ontwikkelingen in de fysica, in het bijzonder de quantummechanica, die het determinisme uit de natuurkunde had weggenomen. In een brief aan Max Born, die fysicus die een waarschijnlijkheids-interpretatie aan de golffunctie van het elektron had gegeven, schreef hij nog: 'U gelooft in een God die met dobbelstenen speelt en ik in volmaakte wetten in een wereld van reële objecten'.

Einstein was niet de enige die niet hield van een wereldbeeld, zoals voorgeschoteld door de quantummechanica, waarin de natuur zich niet langer continu gedraagt maar vreemde discontinuïteiten vertoont, waarin plaats en snelheid van een elektron of elk ander deeltje niet langer meer exact bepaald zijn, waarin de materie een golfkarakter bezit en golven een deeltjeskarakter. Maar deze tegenstanders hebben de ontwikkeling van de theorie niet kunnen stuiten. Op dit ogenblik is de quantummechanica een hoeksteen van de wetenschap, die samen met de relativiteitstheorie (van Einstein) de klassieke mechanica als fundamentele theorie verdrongen heeft. De wetenschap verloor er wel haar exacte karakter en een deel van haar oude dromen bij.

Nu het klassieke ideaal het heelal ooit in al zijn details exact te kennen voorgoed vergaan is, verlegden de oorspronkelijke doelstellingen zich. Maar het werd gèen terugtocht, integendeel. De nieuwe inzichten werden nieuwe uitdagingen met nieuwe mogelijkheden. De interne structuur van atomen en moleculen wordt nu begrepen, een inzicht dat onmogelijk met de klassieke begrippen verworven kon worden.

De conceptuele uitbreiding van het wetenschappelijk gedachtengoed kan niet ten einde zijn. De natuur is nog steeds gevarieerder, rijker en complexer dan de formalismen van de huidige wetenschap toelaten te beschrijven. Het leven op aarde getuigt daarvan. Spontaneïteit, creativiteit en doelgerichtheid zijn aspecten van de natuur die door een mechanistische wetenschap geloochend worden, maar die niemand ontgaat die met onbevangen blik om zich heen kijkt. De wetenschap kan zich terugtrekken voor dit formidabele fenomeen maar dat tast haar effectiviteit aan en moet uiteindelijk ook haar geloofwaardigheid in het gedrang brengen.

De wetenschap kan zich niet veroorloven haar geldigheidsdomein te beperken. Een uitbreiding die de biologische processen omvat, niet enkel als biochemische mechanismen maar vanuit hun eigen oorsprong en inspiratie, kan echter niet binnen de klassieke, mechanistische wetenschap. Het kan ook niet als de enige onzekerheden die worden toegelaten de quantummechanische onbepaaldheden zijn.

Maar nu oude, door wetenschappelijke puristen ooit verfoeide begrippen als waarschijnlijkheid en onbepaaldheid, een plaats hebben kunnen krijgen binnen het wetenschappelijke denken, kan het niet meer uitgesloten worden dat andere, traditioneel misprezen concepten een plaats verwerven in het wetenschappelijk wereldbeeld. Misschien moet de wetenschap haar strikt rationeel karakter prijs geven. Misschien moet oorzakelijkheid als samenhang in het natuurgebeuren met vormen van doelgerichtheid of vrije wil aangevuld worden. Misschien verdienen, naast grootheden als massa en energie, ook begrippen als schoonheid of vrijheid erkend te worden als fundamentele drijfkrachten van de natuur.

Het gevoel dat de wetenschap zoals ze nu bestaat, niet volstaat om het levensverschijnsel te omvatten, is reeds eerder uitgedrukt door enkele natuurkundigen. In zijn boekje 'What is Life?' (1944) stelt E. Schrödinger het probleem aan de orde of leven vanuit zuiver natuurkundige beginselen beschreven kan worden. Hij komt tot het besluit dat een aantal typische kenmerken van het leven, zoals de evolutie onder invloed van genetische mutaties, niet in strijd zijn met de quantummechanische eigenschappen van moleculen. Maar anderzijds lijkt het vermogen van levende wezens hun hooggeorganiseerde structuur op te bouwen hem niet verklaarbaar met behulp van bestaande fysische inzichten. Volgens Schrödinger zijn daartoe volledig nieuwe principes nodig, die echter niet vreemd moeten zijn aan fysica, omdat zij de huidige concepten kunnen omvatten. Ze dienen er wel bovenuit te stijgen.

Ook Eugene Wigner, een andere pionier van de quantummechanica, meent dat de problematiek van het leven om een uitbreiding van de fysica vraagt. Juist zoals de gravitatietheorie een goede theorie is zolang enkel gravitatiekrachten binnen het beschouwde systeem optreden, en de macroscopische theorieën van de thermodynamica goede theorieën zijn zolang het systeem vele miljoenen atomen bevat, zo ook, meent Wigner, zijn de huidige microscopische theorieën goede theorieën zolang alleen krachten optreden waarin leven en bewustzijn geen rol spelen. Waar dat wel het geval is, moet de theorie uitgebreid worden op zo'n wijze dat de nieuwe inzichten de oude nog steeds omvatten, maar dat het geldigheidsdomein van de oude denkbeelden tot de levenloze materie beperkt blijft.

Is dat dan de weg? Vraagt het probleem van het leven om een nieuwe fysica? Het antwoord staat geschreven in wat we zelf zijn, maar het is daarom nog niet leesbaar. Het antwoord zit ook in die oude pereboom. Heeft die een bedoeling, die het versleten bankje niet kent?

8

De orde van een organisme

Er heerst orde in de structuur van een levend wezen maar deze orde heeft niets te maken met de regelmaat van een kristal of met de voorspelbare werking van een machine. De mechanismen die een organisme doen functioneren verlopen wetmatig als een klok maar sluiten, vreemd genoeg, vrijheid en willekeur niet uit.

Het vreemde van de aarde is het vreemde van het leven. De biologische ontwikkeling die de aarde ondergaat kan niet de normale evolutie zijn van een planeet. Het is een zonderling, buitenissig en uniek avontuur, waarvoor het scenario niet geschreven kan zijn in het zand van deze wereld. Er zit originaliteit in het leven, eigenzinnigheid en tegenstrijdigheid. Niets in de wetten van de natuur schrijft voor dat de bizarre structuren en gedragingen die we leven noemen, noodzakelijk uit de bodem van deze planeet moeten opduiken.

Dat de wetenschap er toch in slaagt veel van de levensverschijnselen vanuit de fysische en chemische wetmatigheden te verklaren, verscherpt het wonder. Blijkbaar werken de strakke natuurwetten toch mee met het onberekenbare leven en gedoogt het leven de natuurwettten tot diep in de eigen weefsels. Maar het is een vreemde, bijna onnatuurlijke samenwerking. Alsof de slaaf zijn meester manipuleert. Met vernuft en durf gebruikt het leven de chemische eigenschappen van atomen en moleculen om daarmee eigen verbindingen op te bouwen die vervolgens flagrant zondigen tegen de elementaire regels van de chemie.

Zo althans lijkt het. De meest onwaarschijnlijke atomaire constructies komen tot stand onder invloed van de biochemische processen. Niet alleen weigeren de gevormde produkten in chemisch evenwicht te komen met hun omgeving, maar ze vertonen een structuur die in al hun complexiteit en doelmatigheid onmogelijk door spontaan verlopende reacties kan worden gevormd.

En het gedrag ervan is 'onnatuurlijk', en in elk geval onbegrijpelijk. Eens tot leven gekomen, past het gedrag van de materie niet meer binnen het normale causaliteitsschema. Een levend wezen handelt doorgaans niet

tengevolge van een oorzaak, maar wel in antwoord op een uitdaging. Het gedrag ervan is niet langer een effect, maar een respons, of zelfs een initiatief. En voor dat alles worden de blinde natuurkrachten zelf ingeschakeld.

Op een manier die niet beantwoordt aan haar normale neigingen, wordt de natuur door het leven verplicht in de pas te lopen. Atomen en moleculen verliezen hun normale wanordelijke vrijheid en krijgen een plaats volgens een strikt schema. Alles wordt georganiseerd. Elke molecule wordt een radertje in een groot en ingewikkeld apparaat, met een opgelegde functie. Het leven schept orde in de grote moleculaire wanorde en legt een plan in de doelloze materie. Elk deeltje dat in een organisme wordt opgenomen, verliest zijn vrijheid ten voordele van het hele organisme.

In dit hoofdstuk nemen we enkele aspecten van deze biologische orde onder de loupe. We geven een bondige beschrijving van enkele der meeste treffende facetten, vooral bedoeld als illustraties van het hypercomplexe en doelgerichte karakter van de levensactiviteiten.

Het inzicht in de inwendige structuren van het leven dat de biologie oplevert, kan het mysterie van het leven niet wegnemen, integendeel, het legt er de nadruk op. Ik kan me niet ontdoen van de indruk dat de vele details van de biochemische processen, hoe belangrijk en fascinerend ook, niet echt relevant zijn voor het werkelijke vatten van het levensverschijnsel, evenmin als het relevant is voor een goed begrip van een computer-databank de werking van een flip-flop schakeling te begrijpen, of voor het genieten van een aria de frequenties van de klanken te kennen. Maar als de hoop zou verzwinden het karakteristieke van het leven ooit volledig te doorgronden, dan moet het doel van onze wetenschappelijke onderzoekingen juist zijn dit mysterie zelf in volle omvang en duidelijkheid te stellen.

Morfogenese van een dier

Elke dag voltrekt het mirakel zich miljarden keren, overal op aarde, in het water, in de grond, in een veilig nest of warme buik: een onopvallende, nietige cel, zelf nog jong en onopgemerkt, deelt zich in twee, in vier, in acht, in zestien... deelt zich, deelt zich... Uit de oorspronkelijke cel, de zygote, die meestal te klein is om met het blote oog gezien te kunnen worden, vormt zich een tros cellen, aanvankelijk nauwelijks groter dan de zygote, maar altijd verder opgesplitst. De zygote was zelf voordien gevormd door de samenvoeging van een mannelijke sperma-cel en een vrouwelijke eicel en vormde een nieuwe combinatie van erfelijke eigen-

schappen. Met het proces van opeenvolgende delingen is ze begonnen aan de opbouw van een nieuw organisme.

Elke cel, zowel de zygote als haar talrijke dochtercellen, is een minuscule eenheid van leven, zinderend van activiteit, vol geheime voornemens. Opgesloten binnen het vliesdunne celmembraan, bevindt zich de gel-achtige kleurloze massa van het protoplasma, doorschijnend, beweeglijk, trillend en intens actief. In het protoplasma liggen de vitale organen van de cel: de mitochondriën voor opslag en vrijmaking van energie, ribosomen voor produktie van eiwitten, en vele andere structuren voor aanmaak, opslag, transport en afbraak van produkten. Temidden van het kluwen zweeft, als een transparant eiland in een transparante zee, een kleine ronde massa, de celkern, omgeven door een eigen membraan en voorzien van eigen interne structuren voor de uitvoering van zijn belangrijke taken. De kern is de centrale commando-eenheid van de cel. Van hieruit vertrekken de instructies die alle activiteiten regelen, hier ligt het geheim, het grote plan waarvoor elkeen zich uitslooft. Alleen de kern weet wat moet worden ondernomen.

In regelmatig ritme voltrekken de celdelingen zich. Bij elke deling vindt binnen de dik-vloeibare massa van het celprotoplasma een complexe reorganisatie plaats. In de kern komen kleine langwerpige structuren te voorschijn, de chromosomen, het zijn de eigenlijke dragers van de erfelijke eigenschappen. Zij splitsen zich terwijl de kern zelf oplost, daarna schuiven ze naar tegenover elkaar liggende delen van de cel waar ze zich opnieuw groeperen. Tal van protoplasmastructuren verdwijnen en de gehele cel snoert zich in. Tussen de celhelften vormt zich een nieuw membraan en beide delen komen los van elkaar. In elk van de twee dochtercellen vormt zich een nieuwe kern en alle ontbrekende onderdelen worden bij geproduceerd.

Alle gevormde cellen leggen zich in een gesloten laag naast elkaar zodat het geheel de vorm aanneemt van een holle bol. Dit is de blastula. De holte binnenin is met vocht gevuld. Geleidelijk voltrekt zich een ander wonder, nu niet binnen elke cel afzonderlijk, maar op het niveau van de ganse blastula. De cellengemeenschap differentieert zich. Niet alle cellen krijgen eenzelfde bestemming toegewezen, of voelen zich voor dezelfde taken geroepen. Er ontstaan, met het oog op de verdere ontwikkeling, verschillende kiemlagen. Een deel van de cellen vormt een instulping in de bol, die zich verder ontwikkelt en zo de endoderm vormt. Ook aan de buitenkant gaan celdeling en groei door; de cellen daar zijn doorgaans wat kleiner van formaat en vormen de ectoderm. De structuur die te voorschijn komt, en die steeds groeit en in afmetingen toeneemt, is de gastrula. In vorm en functie zullen beide kiemlagen van de gastrula zich volledig verschillend ontwikkelen.

Bij primitieve meercellige dieren zoals kwallen en poliepen houdt de ontwikkeling in dit stadium op. Maar het slijmerig lichaam van deze holtedieren is niet het enige wat het leven uit een gastrula te voorschijn kan toveren. Bij meer ontwikkelde dieren gaat de ontwikkeling verder en leidt zij tot een ingewikkelde morfologie en toegespitste specialisatie van cellen. Tussen ectoderm en endoderm vormt zich nog een kiemlaag, de mesoderm. Al deze cellagen vormen het uitgangsmateriaal voor de organen met zeer specifieke functies. Verdere plooiingen en migraties van cellen geven het groeiend organisme geleidelijk aan een eigen gestalte. Door differentiatie van de ectoderm ontstaat de opperhuid met bijbehorende klieren en zintuigcellen. Uit de endoderm worden de darmwand en longen of kieuwen gevormd. Uit de mesoderm ontstaan door verdere celdifferentiatie het geraamte en bloedvaten.

Het is een gecompliceerd proces dat zich vertakt in een groot aantal precies op elkaar afgestemde deelprocessen van weefselgroei en orgaanvorming. In onderlinge samenhang en synchronisatie worden zo de vele onderdelen van het organisme gevormd en op hun functies voorbereid. Met dezelfde zekerheid waarmee bepaalde cellen spierweefsel vormen, scheppen andere cellen de structuur van een oog met regelbare focus en diafragma. Hoe kunnen cellen die nooit eerder zagen hoe een lens een beeld werpt op een netvlies, uit eigen beweging dit mechanisch-optisch meesterwerk samenstellen? Dit is alleen denkbaar als de instructies daartoe minutieus en accuraat aan deze cellen worden meegegeven, samen met de middelen om de taak te volbrengen.

De onaanzienlijke gastrula, die nog geen onderscheid liet zien van klasse of soort, manifesteert een onvermoede scheppingskracht. Er zijn geen ingrepen van uitwendige factoren, alles gebeurt uit eigen beweging. Alsof ze gedreven worden door een innerlijke stem schikken en differentiëren de cellen zich op zo'n wijze dat een samenhangend lichaam ontstaat. Alle dieren doorlopen dezelfde embryonale ontwikkeling. De vormen van het volwassen lichaam zijn nog niet terug te vinden in de amorfe celmassa van een gastrula. Diep in de kernen van haar cellen draagt deze gastrula echter wel reeds het geheim van haar bedoeling, maar nog niets verraadt op dit ogenblik het grote plan. Zwijgend voedt zij zich en groeit verder.

Langs experimentele weg is vastgesteld dat de informatie die nodig is voor de opbouw van een lichaam, in de chromosomen van de celkern vervat zit. Deze chromosomen worden bij een celdeling in ongewijzigde vorm aan de dochtercellen doorgegeven. De oorspronkelijke cel produceert daartoe eerst de dubbele hoeveelheid chromosomenmateriaal en verdeelt dat gelijk over beide nieuwgevormde cellen. Behalve de geslachtscellen, waarin slechts de helft van het normaal aantal chromosomen

voorkomt, bezitten alle cellen in een lichaam daarom exact hetzelfde aantal chromosomen van hetzelfde type (behoudens accidentele afwijkingen).

Volwassen meercellige dieren bestaan doorgaans uit een zeer groot aantal cellen. Het lichaam van een volwassen mens bijvoorbeeld is samengesteld uit tien tot honderd biljoen cellen, alle met dezelfde chromosomen, voortgekomen uit één cel, de oorspronkelijke zygote. Elke cel, huidcel, hartcel, hersencel of welke ook, bevat in zijn chromosomen steeds àlle informatie om het gehele lichaam op te bouwen. Een darmcel 'weet' dus ook hoe een oog gemaakt moet worden.

Waarom nemen de cellen tijdens de embryonale ontwikkeling dan elk een ander deel van de taak op zich? Hoe weet een cel welk deel van het plan haar is toevertrouwd? De vragen die hier opdoemen, kunnen slechts ten dele beantwoord worden vanuit de experimentele en theoretische inzichten van de moderne moleculaire biologie.

Het is op zichzelf een verbazend feit dat uit een verzameling identieke cellen — identiek omdat zij alle via eenzelfde mechanisme eenzelfde stel chromosomen hebben meegekregen — verscheidenheid te voorschijn komt. Hoe kunnen gelijke cellen een verschillend lot kennen? Er zijn echter experimentele gegevens die erop wijzen dat bepaalde substanties in het cytoplasma van de zygote (het deel van de cel buiten de kern) van bij de aanvang ongelijk verdeeld zijn. Niet alle cellen die uit de zygote voortkomen hebben daarom een precies gelijke samenstelling meegekregen. Het is echter moeilijk of niet in te zien dat een simpel verschil in concentraties van enkele stoffen aan de basis kan liggen voor de extreem complexe differentiatie die de cellen nadien ondergaan. Daarvoor moet een meer gecompliceerd en geschikt mechanisme bestaan.

Volgens François Jacob en Jacques Monod komen er in de celkern stoffen voor die in staat zijn een deel van de informatie, opgeslagen in de chromosomen, te onderdrukken. Op die manier zou in elke cel slechts een selectieve vertaling plaats vinden van de complete boodschap die in de zygote aanwezig was. In principe is dan de mogelijkheid aanwezig tot regulatie en controle van de opdrachten die de cellen moeten uitvoeren.

De Jacob-Monod hypothese zou een belangrijke aanwijzing kunnen geven over de wijze waarop de cellen te werk gaan bij de totstandkoming van een organisme, maar zij lost het probleem fundamenteel niet op. Welk streven of welke dwang ligt ten grondslag aan dit spontaan ontstaan van vorm en verscheidenheid in de natuur? Als alle bestanddelen van elke cel precies hun werk doen, bouwen zij een organisme op dat klaarblijkelijk het doel was van de hele onderneming. Hoe kan dit organisme zichzelf echter reeds aan deze bestanddelen kenbaar hebben gemaakt, nog vóór of tijdens zijn wording?

Een levend wezen bouwt door z'n groei een vorm en structuur op die voordien niet bestond. Het proces is niet te vergelijken met de groei van een kristal, een waterdruppel of een ster, omdat het niet een simpele accumulatie van materie is waarbij een vorm wordt aangenomen die deze materie een zo stabiel mogelijke configuratie geeft. Het proces vertoont ook geen overeenkomst met de groei van een wolk of van vuur, waarbij enkel willekeur en beperkingen opgelegd door het milieu het resultaat bepalen. Het is eerder te vergelijken met de bouw van een huis. Materiaal wordt verzameld en dan nauwkeurig volgens een vooraf opgemaakt plan samengevoegd. De structuur op het plan is niet willekeurig en ook niet afleidbaar uit een heersende toestand of uit basis-natuurwetten, maar beantwoordt aan de verwezenlijking van een doel. Geen enkel bouwelement, geen baksteen, geen raam, geen elektrische draad, kan echter ook maar het geringste besef hebben van het doel dat gediend wordt. Elk onderdeel voert gewoon zijn taak uit, overeenkomstig het plan.

De genetische code

De zygote krijgt de helft van haar chromosomen van de mannelijke, en de andere helft van de vrouwelijke geslachtscel die haar hebben samengesteld. Het plan voor de bouw van het organisme zit in deze chromosomen besloten en is daardoor van beide ouders afkomstig. Het zal nadien, als het te vormen organisme op zijn beurt geslachtsrijp is, weer verder worden doorgegeven, zij het dan in een nieuwe combinatie, want naast de eigen bijdrage moet die van de partner worden gevoegd die één van zijn of haar geslachtscellen beschikbaar stelt voor de vorming van de nieuwe zygote. De chromosomen zijn daardoor de dragers van de erfelijkheid van elke biologische soort.

De moderne biologie heeft dit beeld aanzienlijk verfijnd en aangevuld. Hierdoor is veel aan het licht gekomen van de wijze waarop deze erfelijke informatie is opgeslagen, en hoe zij daadwerkelijk wordt gerealiseerd. We overlopen hier beknopt en schematisch deze fascinerende feiten, zonder ons te verdiepen in de vele details of ons het hoofd te breken over de vraagstukken waarvoor de onderzoekers zich nog geplaatst zien. We verwonderen ons over het gedrag dat hier wordt aangenomen door wat uiteindelijk nog altijd banale atomen zijn, dezelfde als in een fles mineraalwater.

De erfelijke eigenschappen van alle organismen, zowel bacteriën, planten als dieren, liggen in chemische vorm opgeslagen in een stof met ingewikkelde moleculaire vorm en samenstelling, DNA genoemd (van *d*eoxyribo*n*ucleic *a*cid). Dit DNA vormt het hoofdbestanddeel van de

chromosomen in de celkern (bij de bacteriën, die geen chromosomen en geen celkern bezitten, ligt het verspreid in het cytoplasma). Heel de verscheidenheid en soortenrijkdom van de levende natuur zit besloten in het DNA dat in elke levende cel voorkomt. Het zijn reusachtige moleculen die vele miljoenen, dikwijls miljarden atomen bevatten. Toch komen er in DNA niet meer dan vijf verschillende atoomsoorten voor: koolstof, waterstof, zuurstof, stikstof en fosfor. Het is merkwaardig dat het leven het potentieel van chemische elementen op aarde slechts voor zo'n klein deel benut; van de bijna honderd elementen die beschikbaar zijn, gebruikt het er alles bij elkaar minder dan de helft; DNA zelf, zoals gezegd, zelfs minder dan een half dozijn.

Een DNA molecule is een delicate constructie. Elk van de atomen binnen de molecule neemt een stand in die nauwkeurig bepaald is. Het is precies door de schikking van de atomen en de ruimtelijke vorm die de molecule daarbij aanneemt, dat de genetische eigenschappen van het organisme bepaald zijn. De drie-dimensionale vorm van DNA werd voor het eerst ontsluierd door James Watson en Francis Crick. Het resultaat van hun onderzoekingen verscheen in 1953 in het tijdschrift *Nature*; het artikel werd een mijlpaal in de geschiedenis van de biologie en leverde de auteurs een Nobelprijs op.

Elke molecule DNA bestaat uit een lange dubbele keten die spiraalsgewijs is opgewonden. Elke keten bestaat uit een aaneenschakeling van zogenaamde nucleotiden. Een nucleotide bestaat uit een fosfaat en een suiker (deoxyribose) waarop een stikstofhoudende base is gebonden: adenine, thymine, guanine of cytosine. De fosfaten en suikers vormen het skelet van de hele structuur, maar de basen bepalen er de inhoud en betekenis van. De beide nucleotide-strengen van de spiraal zijn met de stikstofhoudende basen aan elkaar gebonden. Dit gebeurt op zo'n wijze dat een adenine van de ene streng steeds tegenover een thymine van de andere streng geplaatst is, terwijl tegenover een cytosine steeds een guanine ligt. Alleen op deze manier passen de ketens in elkaar. Bij elke andere combinatie zou de vorm niet precies aansluiten en is geen chemische binding mogelijk. Dank zij het feit dat elke base zijn vaste partner heeft, vinden we de volgorde van de basen in de ene keten exact terug in de andere, maar in complementaire vorm. Beide nucleotide-strengen zijn dus als het ware elkaars afdruk.

Het is gebleken dat de basen in het DNA, per drie samengenomen, een aminozuur coderen. Aminozuren zijn bestanddelen die in lange ketens kunnen worden aaneengeregen waardoor dan de eiwitten worden opgebouwd. Deze eiwitten zijn zelf de eigenlijke bouwstenen van de levende wezens, verantwoordelijk voor de structurele opbouw ervan, maar ook voor de uitvoering of katalyse van een zeer groot aantal chemi-

sche functies. Er zijn slechts een twintigtal aminozuren die gebruikt worden om de grote verscheidenheid aan eiwitten samen te stellen. Weer blijkt hoe zuinig het leven omspringt met de beschikbare middelen, want er is geen fundamentele chemische reden voor deze beperking. In principe zou een veel groter aantal verschillende aminozuren kunnen worden gebruikt. Blijkbaar beseft het leven dat een groei in complexiteit noodzakelijk vraagt om een in de hand houden van complexiteit.

De aard en volgorde van de aminozuren in een eiwitmolecule bepaalt de eigenschappen ervan en de rol die het in de levende cel te vervullen heeft. De combinatie van de stikstofhoudende basen in drie opeenvolgende nucleotiden van een DNA-keten komt overeen met een bepaald aminozuur. De zogenaamde genetische code schrijft voor welke van de mogelijke combinaties van vier basen in groepjes van drie correspondeert met elk van de twintig aminozuren. Via de lange rij nucleotiden wordt op die wijze vastgelegd in welke volgorde de aminozuren aan elkaar gekoppeld moeten worden om de eiwitten samen te stellen. DNA moleculen bevatten op die wijze het plan zelf van de biologische soort waarin ze voorkomen.

We zijn daarmee ver verwijderd van de schamele moleculen van de niet-biologische scheikunde. Water, methaan, zwavelzuur, koolstofdioxyde, natriumchloride, calciumcarbonaat, benzeen, ammoniak en vele andere, zijn verbindingen van atomen, meestal niet veel meer dan een tiental, opgebouwd onder invloed van de neigingen van atomen om met elkaar verbindingen aan te gaan. Het zijn de elektronenconfiguraties binnen de atomen die de krachten opleveren waarmee deze atomen zich in welbepaalde verhoudingen aan elkaar hechten. Bij deze verbindingen worden de stabiele, welbegrepen moleculen van de klassieke scheikunde gevormd. Deze moleculen kunnen zich verder rangschikken tot kristallen, ofwel in ordeloze toestand door elkaar heen blijven liggen, zoals in amorfe vaste stoffen en, naarmate ze beweeglijker zijn, in vloeistoffen en gassen. Steeds streeft de stof er daarbij naar in een zo stabiel mogelijke toestand terecht te komen, in evenwicht met de omgeving, waarna alle verdere interatomaire uitwisselingen stilvallen. Er is geen hogere opdracht weggelegd voor deze moleculen; ze zijn gewoon zichzelf.

Hoe anders is een DNA! Hier is geen sprake van een stevige molecule gevormd als het onvermijdelijk resultaat van evenwicht-zoekende krachten. Hier ook geen sprake van een simpele en stabiele atoomcombinatie, maar wel van een ingewikkeld systeem van atomen, strikt georganiseerd met een welbepaald doel voor ogen. Een DNA molecule is evenmin een blinde combinatie van atomen als dit boek een willekeurige opeenvolging van letters zou zijn. Er zit een betekenis opgesloten in de structuur van het DNA die de loutere fysica ervan overstijgt. Hier zien we, gegrift in een

molecule, de opdracht voor de opbouw van een levend wezen.

De vergelijking van DNA met een boek mag bijna letterlijk genomen worden. Zowel een DNA molecule als een boek bevatten een zorgvuldig uitgekozen volgorde van symbolen die een boodschap beschrijven. En het is deze boodschap die de bestaansreden van zowel de molecule als het boek is. De vier stikstofhoudende basen zijn de letters van het biologische alfabet; de genetische code, die het verband legt tussen de basensequenties en de aminozuren, is de taal. De opbouw van het organisme is de boodschap.

Binnen een DNA molecule zijn dezelfde krachten tussen atomen aan het werk als binnen een watermolecule, maar dat is bijkomstig geworden. In het DNA teffen we ook dezelfde soorten atomen aan als elders in de natuur maar ook dat is hier van ondergeschikt belang. De chemische samenstelling van de inkt waarmee de letters op dit blad gedrukt werden, is niet essentieel voor de betekenis van wat zij uitdrukken. De volgorde van de letters en andere tekens is het belangrijkste, want die bepaalt de inhoud. Op dezelfde wijze is de volgorde van de basen in het DNA de essentie van deze molecule.

De chemische samenstelling is het enige wat in de levenloze natuur een molecule karakteriseert, maar deze loutere samenstelling is niet langer het wezenlijke van biologische moleculen. De rol die de molecule in het groter geheel van het organisme te spelen heeft, haar functionaliteit, is haar kenmerk en bestaansreden geworden. De samenstelling van het metaal waaruit een sleutel is gemaakt, bepaalt niet welk slot ermee geopend kan worden. Dat wordt uitgemaakt door de geslepen vorm van de baard. De essentie van een sleutel zit in z'n vorm, niet in de aard van het materiaal waaruit hij bestaat. Het is deze vorm die de rol vastlegt die hij speelt, en die de enige reden van zijn bestaan is. Op analoge wijze wordt het wezen van DNA bepaald door de inwendige vorm van de molecule. Wat de atomen vanuit hun eigen bindingsmogelijkheden technisch in staat zijn te realiseren, mag dan wel aan de basis liggen van de opbouw van de molecule, dit is echter een aspect dat niet langer als de enige of belangrijkste oorzaak kan worden gezien voor de functie van de molecule. Die wordt bepaald door uitzicht en eigenschappen van het organisme dat door het DNA beschreven wordt.

Een DNA molecule drukt een voornemen uit, niet een gehoorzaamheid aan natuurwetten.

Dit betekent dat een planmatige en doelgerichte orde heerst in de moleculaire opbouw van de levende wezens. De stoffen waaruit de organismen bestaan, worden samengesteld volgens een gepland schema dat tot doel heeft een organisme in zijn geheel tot stand te brengen.

Niet slechts de structuur van een DNA molecule, maar het hele func-

tioneren van een biologische cel spreekt van een georganiseerde aanpak. De structuur van een DNA bepaalt wel de wijze waarop de eiwitten dienen opgebouwd, maar dit is nog niet meer dan een opzet. De eigenlijke actie, de synthese van de eiwitten zelf, moet nog geschieden overeenkomstig de instructies opgeslagen in het DNA. De wijze waarop dit gebeurt is geraffineerd en perfect opgezet.

De spiraalvormige DNA molecule is in staat zichzelf te ontrollen. De beide polynucleotide-strengen komen dan gestrekt naast elkaar liggen. Vervolgens scheurt de molecule open; de beide ketens komen los van elkaar, ongeveer zoals de twee helften van een ritssluiting die opengeschoven wordt. Op deze wijze komen de stikstofhoudende basen van beide helften bloot te liggen, klaar om 'gelezen' te worden. Dit gebeurt door moleculen van het RNA type (*r*ibo*n*ucleic *a*cid). Deze RNA's bestaan uit enkelvoudige nucleotide-ketens waarin stikstofhoudende basen zijn opgenomen van hetzelfde type als bij DNA, met als enig verschil dat geen thymine voorkomt. In de plaats daarvan treffen we het sterk overeenkomstige uracil aan.

De RNA moleculen scharen zich tegen de basen van het geopende DNA en maken er een afdruk van. Dit doen ze door tegenover elke base een complementaire base te plaatsen, opnieuw volgens de structurele overeenkomsten: tegenover een adenine wordt een uracil geplaatst, tegenover een uracil een adenine, tegenover een guanine een cytosine en tegenover een cytosine een guanine. Op die wijze neemt het RNA de informatie over die vervat zit in het DNA en maakt er een transcriptie van.

Na afloop van deze 'leesprocedure' bevat de basensequentie van het RNA dezelfde informatie als die van het DNA. Met deze inhoud trekt het RNA dan doorheen het membraan van de celkern en komt in het cytoplasma terecht, waar de eigenlijke eiwitsynthese plaats moet vinden. Het is een der taken van de celkern het genetisch materiaal opgeslagen in het DNA constant te bewaren en bij celdeling door te geven aan de nakomelingen. Het behoort tot de functies van het cytoplasma van de cel de eiwitten te synthetiseren die nodig zijn voor het functioneren van het organisme. RNA moleculen brengen de booschap hoe dit moet gebeuren van de kern naar het cytoplasma. Deze RNA wordt daarom ook messenger-RNA genoemd (kortweg m-RNA).

In het cytoplasma bevinden zich talrijke ribosomen, kleine organellen waar de synthese van de eiwitten plaats vindt. Het m-RNA trekt naar deze ribosomen en ontmoet daar RNA moleculen van een ander type, transfer-RNA (t-RNA). Aan deze t-RNA moleculen zitten aminozuren gehecht. Elk triplet basen van de t-RNA-keten draagt het aminozuur dat ermee overeenkomt volgens de genetische code. Weer is het de ruimtelij-

ke structuur van de molecule die er voor zorgt dat de bindingen op eenduidige wijze tot stand komen. Het t-RNA schaart zich tegen het m-RNA en brengt zijn basensequentie in overeenstemming met die van het m-RNA. Hiertoe wijzigt het de volgorde van de eigen basen totdat tegenover elke base de complementaire base gelegen is. Nadien koppelen de t-RNA nucleotiden zich in de nieuwe volgorde aan elkaar en verkrijgen de eraan gehechte aminozuren de corresponderende volgorde. Ook deze gaan nu onderling bindingen aan, en vormen zo een lange keten. Het eiwit is daarmee gevormd, precies volgens de originele voorschriften van het DNA.

Als een perfect ontworpen machine voert de cel deze ingewikkelde reeks taken uit. Er kan een ingenieuze en onaantastbare taakverdeling tussen de moleculen vastgesteld worden. Het DNA bevat de blauwdruk van wat moet worden opgebouwd maar voert zelf niets uit. Douglas Hofstadter beschreef het op zijn manier in de 'Metamagical Themas' van het maart 1982 nummer van *Scientific American*: 'Men kan DNA opvatten als een grote, dikke, aristocratische, vadsige [...] luilak van een molecule. Zij doet nooit iets. Ze is de aartsluiaard van de cel. Zij geeft enkel bevelen en gewaardigt zich nooit zelf iets uit te voeren, ongeveer zoals een bijenkoningin.'

RNA moleculen zijn de werksters. Zij lezen en interpreteren het plan, voeren de bouwelementen aan, en assembleren de nieuwe moleculaire ketens. Ribosomen zijn de produktie-plaatsen. Nog andere, hier niet besproken organellen van het cytoplasma nemen andere essentiële taken op zich, zoals de energie-voorziening, aanvoer van grondstoffen en afvoer van onbruikbaar materiaal.

Alle verrichtingen moeten voortdurend gecoördineerd worden. De snelheden van aanvoer, aanmaak en afvoer moeten op elkaar afgestemd worden en keuzen dienen gemaakt zodat de juiste molecule op het juiste ogenblik op de juiste plaats beschikbaar is. De regulatie van het hele complexe processysteem gebeurt door enzymen die de moleculen activeren op het ogenblik dat deze in werking moeten treden, en desactiveren als hun werking dienst stilgelegd. Deze enzymen zijn zelf eiwitten, aangemaakt door het organisme dat ze besturen. De machine produceert dus haar eigen onderdelen, met inbegrip van de onderdelen die haar regeren.

Mysterie

Het is niet mogelijk dit ganse processysteem voor de aanmaak van de levende substanties te beschouwen zonder onder de indruk te komen, niet enkel van de complexiteit en het vernuft ervan, maar vooral van de

doelgerichte opzet. Hier zijn geen blinde en automatische krachten aan het werk; hier wordt een samenhangend programma afgewerkt, waarbij datgene wordt uitgevoerd wat in de toekomst noodzakelijk zal zijn voor het levende organisme. Hier liggen intenties verscholen achter de moleculaire wisselwerkingen, niet slechts fysico-chemische oorzaken.

Hoe kunnen deze atomen, die buiten een biologische cel niet in staat zijn iets zinvoller te realiseren dan een watermolecule of zandkorrel, deze superbe organisatie opbouwen? Zijn zij, tijdelijk opgesloten binnen een celmembraan, plots geïnspireerd door een hoger doel en begiftigd met intelligentie? En hoe zijn deze microscopische mechanismen gekoppeld aan het grote macroscopisch project, het organisme? Het is het lichaam in z'n geheel dat de cel haar specifieke taken toebedeelt, die leiden tot een selectie van de DNA informatie die dient uitgevoerd. Maar hoe commandeert het lichaam zijn cellen, terwijl het zelf bestaat uit niets dan cellen die alle op hun opdrachten wachten? Het geheel blijkt een eigen dynamiek of doelstelling te hebben, die de delen missen, ook al bevat elk deel 'alle' informatie.

Nog een mysterieus aspect kenmerkt deze cellulaire processen. Het functioneren van het hele systeem dient noodzakelijk betrouwbaar en planmatig te zijn en volgens strikte regels te verlopen, bepaald door de stereochemische structuur van de deelnemende moleculen. In vreemd contrast daarmee, bouwen deze processen een organisme op dat nauwelijks aan regels gebonden is. In vrijheid en spontaneïteit leeft het zich uit, niet in het minst gehinderd door het wetmatige functioneren van zijn onderdelen. De strikte orde op moleculair niveau leidt niet tot vaste en ondoorbreekbare patronen op macroscopisch niveau; integendeel, het is de realisatie zelf van de vrijheid.

De orde van een levend wezen is daarom niet die van een kristal. Er is geen vaste regelmaat of symmetrie in een biologische cel, geen statisch evenwicht klaar om de eeuwigheid te trotseren. De orde is dynamisch en functioneel. Het is een samenhangend optreden van de materie, een coherente organisatie die een doel nastreeft. Het doel is de vrijheid, tegenpool van de harde kristallijne massa.

En toch, het zijn dezelfde atomen, dezelfde krachten die nu eens een zielloos kristal, dan weer een levend wezen tot stand brengen. Wat is de eigen aspiratie, of — als die term misplaatst zou zijn — de spontane neiging van de materie?

Is het een afglijden naar rust en stabiliteit in onvergankelijke verbindingen, als in een kristal of simpele molecule? Atoomfysica en scheikunde zouden voor een dergelijk gedrag een bevredigende verklaring kunnen bieden.

Of is er een spontane evolutie van de materie naar orde en organisa-

tie, een bezieling die de loutere fysica overstijgt? Teilhard de Chardin kende aan alle materie een zeker bewustzijn toe, een 'binnenkant' die er inherent aan zou zijn. Hoe gecompliceerder de structuur van de materie, des te duidelijker treedt dit bewustzijn naar buiten. Het is dit 'innerlijk bewustzijn' dat volgens Teilhard de wereld voortstuwt in zijn evolutie naar toenemende complexiteit en dat de drijvende kracht is van wat hij noemt de noögenese, de groei van het psychische en het individuele bewustzijn.

Maar als deze 'innerlijkheid' bestaat, manifesteert zij zich niet steeds. Over het algemeen lijken banale stabiliteit en passiviteit de voorkeur te genieten, en niet groeiende complexiteit. Alle planeten buiten de aarde zijn levenloze oorden. Geen biochemie daar, laat staan noögenese. Rust en evenwicht zijn de normale toestand in het zonnestelsel, het voorspelbaar resultaat van de krachten opgesloten in de materie. De aarde echter zindert van groei en leven. Vanwaar het verschil? Komt hier het gewoel van een innerlijke drang voor één keer aan de oppervlakte? Of vloeit het levensverschijnsel toch voort uit de gewone en bekende natuurkrachten, via een vooralsnog onbegrepen wending van de mogelijkheden?

Een antwoord op deze vragen, hoe ook geformuleerd en hoe dikwijls ook herhaald, verschuilt zich steeds opnieuw achter de geheimzinnigheid en het ondoorgrondelijke van wat deze planeet overkomt. De weg naar het begrijpen daarvan lijkt afgesneden in alle richtingen. De mechanismen die we hebben bloot gelegd, leveren het antwoord niet. Toch is het probleem niet noodzakelijk uitzichtloos.

Er dient zich een misschien bevrijdend maar nog zeer algemeen antwoord aan, afkomstig uit een onverwachte hoek: de thermodynamica, de wetenschap die werd uitgedacht om het rendement van stoommachines te verbeteren. De thermodynamica zal het probleem echter niet oplossen vooraleer het eerst nog aangescherpt te hebben.

9

Het onvermijdelijke afglijden

Niets is ooit zeker. Aan de geldigheid van elke natuurwet moet uiteindelijk worden getwijfeld. Behalve aan één: de spontane toename van wanorde. Die is onontkoombaar. Door haar verbazingwekkende organisatie lijkt het leven echter juist deze wet te trotseren.

Van oudsher is het verschijnsel warmte in de natuurkunde een moeilijk vatbaar begrip geweest. De manier waarop warmte doorheen de stof steeds spontaan van hoge naar lage temperatuur vloeit, deed aanvankelijk vermoeden dat het om een soort vloeibare substantie zou gaan die de materie doordringt en daar in min of meer grote concentratie voorkomt. Stoffen op hoge temperatuur zouden veel warmte bevatten, die op lage temperatuur minder. Warmte diende dan wel een massaloze substantie te zijn, want nauwkeurige metingen brachten aan het licht dat het gewicht van een voorwerp niet toeneemt als het wordt opgewarmd.

Er ontstonden ernstige problemen met deze opvatting toen bleek dat men op geen enkele manier de 'warmte-stof' zuiver in handen kan krijgen. Langs chemische weg werd ook aangetoond dat de samenstelling van een produkt niet afhangt van zijn temperatuur (afgezien van eventuele ontbindingen tengevolge van te hoge temperatuur). De doodsteek voor de warmte-stof theorie kwam toen men goed en wel inzag dat warmte kan ontstaan uit bewegingsenergie. Warmte is een vorm van energie. Dat was de geboorte van de thermodynamica.

Betekenis van de thermodynamica

In de meest enge betekenis is de thermodynamica de wetenschap die het gedrag van warmte bestudeert. Meer algemeen kan zij omschreven worden als de studie van energie in al haar vormen, in het bijzonder de wijze waarop energie-vormen in elkaar omgezet worden. Zo althans is het begonnen halverwege de negentiende eeuw, maar daarbij is het niet geble-

ven. De op het eerste gezicht niet heel indrukwekkend klinkende wetten die uit de thermodynamica voortkwamen, hebben de wetenschap in haar geheel diepgaand aangetast. In het bijzonder de betekenis van de tweede wet, die ons hier het meest zal bezighouden, bleek van een ongekende diepte en reikwijdte. Tevens bevatte die tweede wet de kiem van alarmerende paradoxen. De thermodynamica introduceerde verscheurende ongerijmdheden in het eens zo onaantastbare bouwwerk van de klassieke natuurkunde.

Ik moet de lezer die zich vertwijfeld afvraagt waar de draad ligt van ons betoog, verzoeken enig geduld te oefenen. De stap van de moleculaire biologie naar de thermodynamica lijkt een sprong van de twintigste naar de negentiende eeuw; het lijkt wellicht ook een sprong wèg van de vragen die ons hierboven bezighielden. Hoe zou de studie van warmte de sleutel kunnen inhouden van het mysterie van het leven? Van de werking van een stoommachine wellicht ja, maar niet van de biosfeer, niet van de genetische code, niet van de bloem die haar kroonbladen openspreidt.

Misschien is de omweg die we nemen groot, inderdaad, maar toch kunnen we niet om de thermodynamica heen kijken. De inzichten die eruit zijn voortgekomen, zijn van zo universele betekenis dat zij rechtstreeks betrekking hebben op alles wat in het heelal gebeurt, het leven inbegrepen. Het leven zelfs, zoals we zullen constateren, in de eerste plaats.

Het leek aanvankelijk niet meer dan een vaktechnische bezigheid van enkele ingenieurs op zoek naar een verhoogd rendement voor de stoommachines die de eerste grote industriële revolutie moesten voortstuwen. Maar het ging al spoedig naar de kern van het gedrag van de natuur. Men ontdekte een samenhang in het globaal gedrag van elk natuurkundig systeem, een verband dat verder ging dan de bekende wetmatigheden van de onderdelen van het systeem. Er dook een logica op in de macroscopische natuur, die niet bestaat op microscopisch niveau. Het was alsof men plots een weg zag, waar men voordien slechts het grint had waargenomen.

De thermodynamica groeide in de diepte en in de breedte, sloeg de details over en werd de wetenschap van de evolutie van het hele heelal. Het succes was te danken aan een nieuwe benadering die op oude problemen werd toegepast. De objecten van de thermodynamica waren niet langer geïdealiseerde begrippen als massapunten of wrijvingsloze banen, die slechts bestaan in de verbeelding van de onderzoeker. Men beschouwde nu rëele voorwerpen, compleet met hun onvolmaaktheden. Wat in de mechanica lastige bijkomstigheden waren die men trachtte te elimineren om tot de waarachtige en zuivere waarheid door te dringen, werden nu de onderwerpen zelf van onderzoek. Wrijving bijvoorbeeld

ging in de beschouwingen een essentiële rol spelen. De wrijving die optreedt bij elke beweging werd niet langer opgevat als een weg te denken neveneffect dat voor het begrijpen van de eigenlijke bewegingswetten onbelangrijk is, maar als een fundamenteel verschijnsel dat iets verraadt van de diepste werking van de natuur.

Van grote betekenis was dat de thermodynamica niet reductionistisch te werk ging. Om het gedrag van een systeem te bestuderen ontbond men het systeem niet eerst in zijn kleinste onderdelen waarvan dan de werking werd onderzocht, maar men beschouwde het globaal. Men kan niet het rendement van een machine berekenen door de eigenschappen in rekening te brengen van alle atomen waaruit het is opgebouwd. Het systeem als geheel vertoont een gedrag en bezit eigenschappen die niet op het niveau van de onderdelen terug te vinden zijn. Systemen, en niet langer deeltjes, werden het onderwerp van studie.

De nieuwe filosofie wierp vruchten af. Het is verbazend hoe uit de problemen van schijnbaar beperkt belang die de thermodynamicus aanvankelijk bezighielden, inzichten te voorschijn kwamen, toepasbaar op alle domeinen van de wetenschap. Fase-veranderingen van de materie, kernreacties in het inwendige van sterren, het schuimen van de golven op zee, en de informatie-stromen in moderne computers grijpen plaats volgens de principes van de thermodynamica. Uit de alledaagse problemen die de eerste stoot gaven, kwamen inzichten te voorschijn van fundamentele betekenis, met filosofische implicaties die nog steeds niet in volle omvang overzien worden.

De geschiedenis van de Westerse wetenschap is een proces van geleidelijke afdaling van het denken uit de hoge regionen van abstracte idealen naar de onvolmaakte wereldse werkelijkheid. Pythagoras meende dat heel het universum door middel van volmaakte rekenkundige verhoudingen kan worden uitgedrukt. Plato achtte enkel die kennis waardevol die betrekking heeft op volmaakte vormen. Zijn methode voor het kennen van de structuur van de wereld was geïnspireerd door de meetkunde, waarin enkel ideale figuren bestudeerd worden. Plato had een minachting voor de directe ervaring, die volgens hem niet de weg naar betrouwbare wetenschap wijst.

Met de Renaissance kwam het besef dat de wetenschap zich niet mag beperken tot het formuleren van elegante theoretische denkbeelden maar een dialoog dient aan te gaan met de natuur. Niet enkel de geest, maar ook de handen moeten gebruikt worden voor het opzetten van experimenten. De waarheid volgt uit waarneming, niet uit authoriteit. Waar de experimentele bevindingen tegen de theoretische denkbeelden indruisen, moeten die denkbeelden, hoe gewaardeerd ook, opgeofferd worden. Dit is wat Thomas Huxley noemde 'the great tragedy of science — the

slaying of a beautiful hypothesis by an ugly fact'. De wetenschap verloor erdoor misschien iets van haar eigen hoogschatting maar niets van haar waardigheid.

De oude voorkeur voor ideale en perfecte wetten leefde nochtans voort en bestaat nog steeds. Galilei, Newton en Einstein geloofden onverminderd in de opvatting dat de wereld een wiskundige structuur heeft en dat zij slechts via wiskundige modellen begrepen kan worden. Toch levert de geschiedenis van de thermodynamica een dramatische illustratie van hoe de rollen verdeeld liggen. Wiskunde mag een belangrijk hulpmiddel zijn maar zij is een slechte ideologie. Vanuit de experimentele bevindingen komen inzichten te voorschijn die niet door deductie of mathematische afleiding kunnen worden achterhaald. Indien het wetenschappelijk streven erop gericht was geweest de mathematische perfectie van de theorieën boven alles te waarborgen, was de tweede wet van de thermodynamica nooit gevonden. Die verdienste kwam de onderzoekers toe die zich neerbogen over de roestige stoomtuigen van de industriële revolutie en zich afvroegen waarom die niet beter presteren.

Onomkeerbaarheid

Dit is de plaats niet voor een grondige uiteenzetting van de thermodynamica. De lezer die zich daartoe aangetrokken voelt, kan één der vele uitstekende werken raadplegen die over dit onderwerp bestaan. Op deze plaats bepalen we ons tot enkele algemene beschouwingen, die ons terug zullen voeren naar de problematiek die ons hier bezighoudt.

Het is wellicht nuttig de oorspronkelijke vraag weer in herinnering te brengen. Wat is, vroegen we ons af, de spontane neiging van de materie? Zal de materie, aan zichzelf overgelaten, opklimmen tot complexe orde en organisatie die zin en vrijheid geeft aan de natuur, of glijdt zij spontaan af naar een staat van rust en evenwicht waarin zich verder niets afspeelt? Het is echter nodig deze vraag zelf in vraag te stellen. Heeft het wel zin te spreken van een trend voor de processen in de natuur?

De wetten van de mechanica en elektromagnetisme die het gedrag van de materie beschrijven, zijn omkeerbaar. Elk proces kan, natuurkundig gesproken, in de tijd worden omgekeerd. Als twee biljartballen botsen, volgen zij banen waarvan men het verloop precies kan berekenen. Na omkering van de snelheden keren de ballen volgens hetzelfde traject naar hun beginposities terug. Een steen die van een toren valt, kan met dezelfde energie terug omhoog gegooid worden en zal dan volgens dezelfde baan dezelfde hoogte terug bereiken. Elke baan kan steeds in beide richtingen doorlopen worden, hoe ingewikkeld zij ook was. Hetzelfde geldt

voor de bewegingen van atomen of elementaire deeltjes. De quantummechanica sluit wel uit dat de gevolgde baan met absolute nauwkeurigheid gekend zou zijn, maar zij verandert niets aan het principe van de omkeerbaarheid. Ook voor atomaire interacties, zoals chemische reacties, geldt de omkeerbaarheid. Andere verschijnselen voldoen er eveneens aan. Als een lichtbundel doorheen een lens passeert, volgt zij hetzelfde gebroken traject dat ook een lichtstraal zou volgen die uit de omgekeerde richting kwam.

Aan alle opgelegde regels over hoeken, krachten en energieën blijft voldaan als de processen omgekeerd worden. Geen natuurwet kan daarom voorschrijven in welke zin de natuur moet evolueren. Elke zin kan. Er is geen enkele fundamentele reden waarom de planeten in tegenwijzerszin omheen de zon lopen, zoals ze doen; de tegengestelde beweging zou even goed kunnen. Als binnen een chemisch systeem een evolutie naar afnemende complexiteit zou optreden, dan kan de tegengestelde evolutie eveneens. Er kan geen voorkeur bestaan in de natuur voor een evolutie in de ene of de andere zin, want in alle wetten van de klassieke en moderne mechanica spelen verleden en toekomst eenzelfde rol.

Toch is dit standpunt onhoudbaar. Het is zelfs zonder meer onzinnig. Indien men een film achterwaarts afdraait, zien we een aaneenschakeling van 'onmogelijke' voorvallen. Een brandende sigaret groeit weer aan terwijl de rook uit de lucht neerdwarrelt en terug in het gloeiend eindje kruipt. De wijnvlek op het tafelkleed krimpt plots samen, springt omhoog en belandt met een schitterende luchtsprong terug in het glas. Hoe absurd al deze situaties ook zijn, er wordt steeds strikt voldaan aan alle voorschriften van de mechanica. Als we de atomen en moleculen op de film afzonderlijk konden waarnemen, zouden we vaststellen dat zij in hun achterwaartse buitelingen nog steeds gehoorzamen aan de wetten van behoud van energie en impulsmoment.

Er bestaan talrijke elementaire natuurlijke processen waarvan het omgekeerde duidelijk niet kan. Als men een zoutkristal in water oplost verspreiden de atomen zich doorheen het water en komen nooit meer samen om een nieuw kristal te vormen (tenzij men al het water verwijdert door wegdampen). Warmte stroomt steeds spontaan van hoge temperatuur naar lage temperatuur. Nooit zag iemand warmte uit zichzelf van een koud lichaam naar een warmer stromen, waarbij het koude voorwerp nog kouder werd en het warme voorwerp warmer. Toch verbiedt geen wet van de mechanica de atomen binnen een lichaam een dergelijke energieverdeling aan te nemen.

Aan alle natuurwetten zou voldaan blijven behalve aan één. De tweede wet van de thermodynamica kent aan de natuurlijke processen een richting toe, los van wat bekend is over het gedrag van de individuele

deeltjes. Het vastleggen van die richting gebeurt aan de hand van een nieuw ingevoerd begrip, een fysische grootheid entropie genaamd. Elk systeem is gekenmerkt door een bepaalde hoeveelheid entropie en bij elk proces moet de entropie toenemen of minstens gelijk blijven. Een afname van entropie kan niet. Dat is de strikte voorwaarde. Op die manier geeft de thermodynamica aan de tijd een oriëntatie. Als de entropie van een systeem toeneemt wanneer een proces zich in de ene zin voltrekt, neemt zij af in de tegengestelde zin, wat het proces onrealiseerbaar maakt. Bij rook die in een sigaret terugkeert, daalt de entropie. Deze ontwikkeling kan dus niet. Het speelt daarbij geen rol als toch voldaan zou worden aan alle wetten die de bewegingen van de individuele deeltjes beheersen; de tweede wet van de thermodynamica legt een bijkomende voorwaarde op.

Het begrip entropie verraadt daarmee iets van de spontane neiging van de natuur en zou dus van grote betekenis kunnen zijn voor de hierboven geformuleerde vraag. Maar wat is entropie? Wat drukt de tweede wet van de thermodynamica precies uit?

Entropie en de tweede wet

Entropie is een nogal moeilijk vatbaar begrip waarvoor in de mechanica geen analoge grootheid bestaat. Het slaat op de toestand waarin een systeem verkeert dat uit een groot aantal deeltjes bestaat. Het is een toestandsfunctie, wat wil zeggen dat elk systeem in dezelfde toestand dezelfde entropie heeft. Er zijn meer manieren om entropie te definiëren, zoals ook de tweede wet op verschillende manieren geformuleerd kan worden.

Men heeft het begrip entropie proefondervindelijk ontdekt. Pas nadien is de diepere betekenis ervan doorgedrongen. Uit alledaagse ondervinding volgt dat het gemakkelijk is mechanische energie in warmteenergie om te zetten. Wie met een boormachine een gat boort in een stuk metaal stelt vast dat de temperatuur ervan stijgt. De bewegingsenergie van de draaiende boor in het metaal wordt door de wrijving in warmte omgezet. Het omgekeerde proces kan ook; men kan warmte omzetten in bewegingsenergie. Dat gebeurt bijvoorbeeld in een stoommachine of in een benzinemotor. Daar wordt een gas op hoge temperatuur gebracht, waarna de warmte van het gas gebruikt wordt om een zuiger in een cilinder te verschuiven. Er is echter een wezenlijk verschil tussen beide processen. De omzetting van beweging in warmte gaat steeds zeer gemakkelijk, gebeurt zelfs altijd spontaan waar wrijving optreedt, bedoeld of niet. De omzetting van warmte in beweging daarentegen is meestal veel moeilijker te verwezenlijken. Er is bijvoorbeeld een ingewikkelde stoommachine voor nodig. Belangrijker nog is dat men bewegingsenergie

zonder moeite *volledig* in warmte kan omzetten, wat omgekeerd niet kan. Van een vallend voorwerp wordt de kinetische energie volledig in warmte omgezet zodra het op de grond tot stilstand komt. Wanneer men echter warmte omzet in mechanische energie wordt onvermijdelijk ook warmte geproduceerd. Een motor levert niet alleen bewegingsenergie op, maar produceert zelf ook warmte. De omzetting gebeurt dus onvolledig; nooit kan al de warmte in beweging worden omgezet.

Deze beperking is fundamenteel en niet enkel een gevolg van onvolmaaktheden van de gebruikte technische middelen. Men kan het rendement van een verbrandingsmotor theoretisch misschien nog wat opvoeren, maar het is uitgesloten een rendement van honderd procent te halen. Dit is de formulering van de tweede wet van de thermodynamica volgens Lord Kelvin: 'Het is onmogelijk een machine te bouwen die warmte uit de omgeving opneemt en deze volledig omzet in mechanische arbeid, zonder verder iets aan de omgeving of zichzelf te wijzigen'.

Rudolf Clausius heeft hetzelfde op een andere manier gezegd: 'Het is onmogelijk een machine te bouwen die geen ander effect produceert dan het transport van warmte van een koud naar een warmer lichaam'. Op het eerste gezicht hoeft het niet evident te zijn dat de beweringen van Kelvin en Clausius gelijkwaardig zijn, maar door elementaire thermodynamische redeneringen, die hier niet besproken zullen worden, kan men aantonen dat beide beweringen logisch equivalent zijn.

Het begrip entropie werd voor het eerst ingevoerd door Clausius in 1850. Het was zeker een der meest briljante ingevingen van de 19de-eeuwse wetenschap. Clausius ging uit van een systeem dat een cyclus reversibel doorloopt. Onder een 'cyclus' wordt hier een proces verstaan waarbij het systeem na afloop terug in exact dezelfde toestand terugkeert als bij de aanvang van het proces. Begin- en eindtoestand zijn dus dezelfde. 'Reversibel' betekent dat het proces op elk ogenblik omgekeerd kan worden omdat alle krachten voortdurend uitgebalanceerd zijn. Het is daarvoor nodig dat elke beweging zeer traag verloopt en dat de warmte-uitwisselingen met de omgeving plaats vinden zonder dat er een temperatuursverschil is tussen het systeem en zijn omgeving. Onder die voorwaarden, zo ontdekte Clausius, volgt uit de tweede wet zoals die hierboven werd geformuleerd, dat voor elke cyclus de som van alle opgenomen en afgestane warmtehoeveelheden gedeeld door de heersende temperatuur, gelijk aan nul blijft (waarbij opgenomen warmte positief gerekend wordt, afgestane warmte negatief).

Het quotiënt van de reversibel uitgewisselde warmtehoeveelheden en de heersende temperatuur werd door Claudius de entropie genoemd. Aangezien deze entropie dus niet veranderd is als het systeem na afloop van het proces in de oorspronkelijke toestand terugkeert, is zij een toe-

standsfunctie. Het heeft daarom steeds zin te spreken van de entropie van een systeem, ook als de processen die het ondergaat niet voldoen aan de strenge voorwaarden hierboven gesteld. Indien zich in een systeem irreversibele processen afspelen, zal het systeem entropieveranderingen ondergaan die dezelfde zijn als deze die zouden optreden onder invloed van denkbeeldige reversibele processen die het van de gegeven begintoestand naar diezelfde eindtoestand zouden voeren als de werkelijke processen. Enkel de toestand waarin een systeem verkeert, bepaalt zijn entropie, niet de wijze waarop het in die toestand verzeild is.

Toch is de wijze waarop de processen doorlopen worden van groot belang. Voor een cyclisch proces blijft, zoals gezegd, de entropie van het systeem constant. Maar er volgt meer uit de tweede wet van de thermodynamica dan alleen dit. Bij reversibele processen wordt er geen entropie geproduceerd. Bij irreversibele processen wel, want de entropie neemt toe volgens de tweede wet. Dit betekent dat voor een cyclisch irreversibel proces, waarbij de entropie van het systeem toch constant blijft, de entropie van de omgeving moet stijgen.

Samengevat kunnen we zeggen: er bestaat een toestandfunctie, die we met S zullen aanduiden en die de entropie wordt genoemd. De totale entropie van het universum blijft constant onder invloed van reversibele processen en stijgt onder invloed van irreversibele processen. De tweede wet kan nu eenvoudig worden genoteerd: $dS \geqslant 0$, waarbij de ongelijkheid slaat op irreversibele en de gelijkheid op reversibele processen. (De notatie dS geeft aan dat de verandering van de grootheid S bedoeld wordt, en niet de grootheid zelf.)

Dit betekent dat de entropie van het heelal niet kan afnemen. Zij moet effectief steeds toenemen. Vrijwel alle natuurlijke processen zijn immers irreversibel (denk aan de achterwaartse afgedraaide film) en leiden tot een stijging van de entropie van de wereld. Enkel perfect uitgebalanceerde processen, als de beweging van de planeten rond de zon, doen de entropie van het heelal niet stijgen, maar ook niet dalen. Over het algemeen is er produktie van entropie, waar ook wat gebeurt. De zon die de aarde verwarmt, de regen die neerstriemt, de planten die groeien, de pianist die speelt, doen door hun activiteiten de entropie van het heelal verder toenemen.

In 1865 schreef Clausius de beroemd geworden woorden neer:

> Die Energie der Welt ist konstant.
> Die Entropie der Welt strebt einem Maximum zu.

Hij vatte daarmee de thermodynamica samen. Wat over de energie wordt

gezegd, slaat op de eerste wet van de thermodynamica, die zegt dat de totale energie-inhoud van het heelal constant blijft, wat er ook gebeurt. Deze eerste wet werpt en belangrijk licht op de wijze waarop de natuur functioneert, maar zij zegt niets over de richting waarin de processen verlopen. Wanneer een vallende steen de grond raakt, zet hij z'n kinetische energie volledig om in warmte-energie, overeenkomstig de eerste wet. Volgens deze zelfde wet zou het echter mogelijk moeten zijn dat de warmte uit de grond zich opnieuw concentreert op de plaats waar de steen ligt en hem van daaruit met grote vaart weer omhoog duwt. Het is de tweede wet die zegt dat dit niet kan. De toestand met de energie onder de vorm van warmte bezit een hogere entropie dan die waarin de steen nog bezig is te vallen. De gevallen steen zal dus niet spontaan weer omhoog rijzen. De tweede wet van de thermodynamica legt wat Sir Arthur Eddington genoemd heeft, de 'pijl van de tijd' vast. Zij geeft een richting aan de processen en dus aan de tijd. Nooit kan de tijd achterwaarts lopen, want in dat geval zouden de processen gebeuren met afname van entropie.

We kunnen nu de cruciale vraag opnieuw stellen en een meer specifiek antwoord verwachten: hoe evolueert de natuur? Zoekt zij evenwicht en rust in stabiliteit, of streeft zij naar complexe organisatie en activiteit?

Het antwoord moet zijn dat de natuur zonder uitzondering streeft naar een toename van de entropie. Maar kan deze uitspraak vertaald worden in de termen waarin de vragen gesteld worden? Wat betekent een toename van entropie voor de toestand van de materie?

Warmte, wanorde en waarschijnlijkheid

Het begrip entropie is voortgekomen uit een analyse van rechtstreekse ervaringen die alle wezen op een asymmetrie in de gedragingen van de natuur: het is wel mogelijk bewegingsenergie volledig in warmte om te zetten, maar het is niet mogelijk warmte opnieuw in bewegingsenergie om te zetten zonder verlies. De toename van entropie van het heelal drukt daarom een achteruitgang uit van de 'kwaliteit' van de beschikbare energie. Hoewel de eerste wet zegt dat energie onvernietigbaar is, blijkt dat niet elke vorm van energie voor elk doel geschikt is. Mechanische arbeid is hoogwaardige energie, warmte is gedegradeerde energie.

Dit onderscheid lijkt een subjectief waarde-oordeel. Het vertolkt een menselijke appreciatie. Mechanische arbeid is nuttige energie die soms duur betaald moet worden, terwijl warmte 'energie-afval' is die dikwijls door speciale koeling moet worden afgevoerd. Maar het onderscheid

beantwoordt tevens aan een fundamentele fysische hiërarchie van energie-vormen. Ook vanuit natuurkundig oogpunt is mechanische energie meer waardevol dan warmte omdat zij meer mogelijkheden biedt. Mechanische energie kan immers steeds worden getransformeerd in een gelijk bedrag aan warmte-energie, wat omgekeerd niet mogelijk is.

Warmte is de ongeordende energie van de deeltjes waaruit de materie bestaat (en van de straling in het luchtledige). Atomen of moleculen bezitten steeds kinetische energie doordat ze in beweging zijn, waarbij ze zich vrij verplaatsen, zoals in een gas, of ter plaatse vibreren. Daarnaast bezitten de atomen en moleculen potentiële energie tengevolge van de krachten die zij op elkaar uitoefenen. Warmte is het geheel van deze energieën.

Wanneer een voorwerp wordt opgewarmd, neemt de energie van alle atomen ervan toe. Deze atomaire energieën zijn echter niet ordelijk op elkaar afgestemd. De atomen lopen of trillen kris-kras door elkaar, zonder orde, zonder samenhang. Warmte is ongeordende energie. Indien alle atomen met gelijke snelheid in gelijke richting zouden bewegen, dan zou het voorwerp zich in zijn geheel verplaatsen. De energie van een dergelijke beweging is echter wat we mechanische energie noemen, niet warmte. Mechanische energie is dus geordende energie.

Als gevolg van de tweede wet is er een onvermijdelijke aftakeling van de mogelijkheden voor arbeid in het heelal. Geleidelijk aan stijgt de warmte-inhoud van het universum, want bij elke omzetting komt warmte vrij die nooit meer volledig terug in een hoogwaardiger energie-vorm kan worden getransformeerd. Uiteindelijk moet alle energie onder de vorm van warmte voorkomen. Er is in die ultieme toestand geen enkele verplaatsing van materie meer mogelijk, want dat zou betekenen dat nog geordende energie overblijft. Alle structuur is verdwenen; wat blijft is een wanordelijk krioelen van atomen. Uit deze toestand is geen terugkeer mogelijk. Dit is de beruchte warmte-dood van het heelal, zoals zij te voorschijn komt uit de tweede wet volgens Kelvin en Clausius.

De toename van entropie impliceert dus een toename van de wanorde van materie en energie in het heelal. De asymmetrie in de mogelijke energie-omzettingen komt neer op een evolutie in één richting van orde naar wanorde.

De Oostenrijkse fysicus Ludwig Boltzmann is er omstreeks 1870 in geslaagd een statistische interpretatie van het begrip entropie te maken, waaruit dit inzicht nog scherper naar voren kwam. Boltzmann heeft getracht de kloof tussen de thermodynamische en atomistische beschrijving van de materie te overbruggen. Als het waar is dat de materie uit beweeglijke atomen bestaat (wat in de tweede helft van de 19de eeuw nog niet algemeen aanvaard was maar door Boltzmann wel werd aangenomen),

dan wordt het gedrag van deze atomen door de wetten van de mechanica beschreven.

Boltzmann zag in dat nieuwe concepten ingevoerd dienden te worden die de mogelijkheid zouden bieden een brug te slaan tussen de fysica van bewegingen van deeltjes enerzijds en de thermodynamica anderzijds. In navolging van wat Maxwell eerder reeds had gedaan, deed hij een beroep op het begrip waarschijnlijkheid. Hij beschouwde een systeem bestaande uit een groot aantal identieke deeltjes die zich met uiteenlopende energieën willekeurig door elkaar bewegen. Het aantal deeltjes werd constant verondersteld, evenals de totale energie ervan. Boltzmann onderzocht nu langs theoretische weg op welke wijze deze deeltjes zich over de verschillende mogelijke energiewaarden zouden verdelen, aannemend dat elk energieniveau dezelfde waarschijnlijkheid heeft ingenomen te worden, en dat de waarschijnlijkheid van een bepaalde verdeling evenredig is met het aantal verschillende wijzen waarop die verdeling tot stand kan komen.

We zullen dit toelichten aan de hand van een voorbeeld. We beschouwen een systeem dat uit slechts acht deeltjes bestaat, genummerd van 1 tot 8, die verdeeld moeten worden over twee energiewaarden, genaamd A en B. De toestand met alle deeltjes op eenzelfde niveau, A bijvoorbeeld, kan dan slechts op één manier verwezenlijkt worden: alle acht in A en geen in B. De toestand met één deeltje in B en de rest in A, kan op acht manieren tot stand komen aangezien er een keuze is uit acht deeltjes voor het deeltje in A. Met acht maal meer mogelijkheden dan het eerste geval, is het voorkomen van deze toestand acht maal waarschijnlijker, redeneerde Boltzmann. Nog meer deeltjes op één niveau doet het aantal mogelijke combinaties, en daarmee de waarschijnlijkheid, verder toenemen. Om de acht deeltjes gelijkelijk over de niveaus te verdelen, vier in A en vier in B, zijn er reeds 70 mogelijkheden, zoals men kan nagaan.

Meer algemeen, volgt uit de combinatierekening dat, om N deeltjes te verdelen in aantallen n_1, n_2, n_3, enzovoort, er P mogelijkheden zijn, waarbij P gelijk is aan $N!/n_1!n_2!n_3!...$ (De notatie N! stelt het produkt voor van alle gehele getallen van 1 tot N. Bijvoorbeeld, $8! = 1 \times 2 \times 3 \times 4 \times 5 \times 6 \times 7 \times 8 = 40320$.) Des te groter P, des te groter de waarschijnlijkheid dat deze toestand optreedt. Men kan bewijzen dat P maximaal wordt wanneer de N deeltjes gelijkmatig over de groepen n_1, n_2, n_3, ..., verdeeld liggen. Extreme situaties, waarbij het merendeel van de deeltjes in slechts één groep zijn ondergebracht, zijn daarentegen zeer onwaarschijnlijk. Een dergelijke toestand zal zich bijna nooit voordoen. Het systeem zal bij voorkeur een gelijkmatige verdeling van zijn deeltjes over de verschillende beschikbare energiewaarden aanemen.

Boltzmann zag in dat zich hierdoor een onomkeerbare ontwikkeling

voordoet, die verband moet houden met een andere onomkeerbare ontwikkeling, de toename van entropie. Een systeem zal steeds evolueren naar een zo waarschijnlijk mogelijke verdeling van zijn deeltjes. Wanneer het terecht gekomen is in een toestand van gelijkmatige verdeling, zal het zich daarin handhaven, want elke andere toestand is minder waarschijnlijk. Er verandert dan verder niets. Hoewel de deeltjes onderling botsen en voortdurend energie uitwisselen, blijft de toestand globaal genomen gelijkmatig verdeeld. Dit is een toestand van evenwicht. Zolang het evenwicht niet bereikt is, evolueert het systeem verder. Boltzmann zag in dat de toename van waarschijnlijkheid geassocieerd moet zijn aan de toename van entropie. Meer bepaald dient er een direct verband te bestaan tussen de waarschijnlijkheid P van een toestand van een systeem, en de entropie van het systeem in die toestand. Rekening houdend met de eigenschappen van entropie volgens de eerder ingevoerde thermodynamische definitie, leidde hij af dat de entropie evenredig is met de logaritme van P. In mathematische vorm uitgedrukt: $S = k \ln P$, waarin k een bepaalde constante is.

De ontdekking van deze relatie moet gerekend worden tot één der belangrijkste revoluties in de geschiedenis van het menselijk denken. Voor het eerst speelt het begrip waarschijnlijkheid in de natuurkunde een fundamentele rol. Waarschijnlijkheid is niet langer enkel een onvolmaakt hulpmiddel dat we hanteren in afwachting van aanvullende kennis die zekerheid moet brengen. Waarschijnlijkheid wordt zelf een fundamentele drijfkracht van de natuur; ze is oorzaak van gebeurtenissen en geeft richting aan de processen.

Maar waarschijnlijkheid blijft ook wat ze was: essentieel onzeker. Een natuurwet die gebaseerd is op een toename van waarschijnlijkheid suggereert slechts wat moet gebeuren, maar dwingt niet. Alles blijft mogelijk. Dat vanuit een bepaalde beginsituatie een verdeling zou optreden met kleinere waarschijnlijkheid dan de oorspronkelijke is niet te verwachten maar is ook niet volstrekt uitgesloten. De tweede wet van de thermodynamica geeft dus geen absolute zekerheid; ze is alleen maar waarschijnlijk!

Een natuurwet is erop betrapt niet absoluut geldend te zijn, enkel maar waarschijnlijk. De hele natuur komt hierdoor op losse schroeven te staan.

Geldigheid van de tweede wet

Het werk van Boltzmann heeft een belangrijk inzicht opgeleverd in de aard van het begrip entropie zelf. Entropie blijkt evenredig te zijn met de

logaritme van het aantal manieren waarop een bepaalde toestand van een veel-deeltjessysteem verwezenlijkt kan worden, en dus met de waarschijnlijkheid van optreden van deze toestand. Deze waarschijnlijkheid is geassocieerd aan de interne orde in het systeem. Een onwaarschijnlijke toestand is een situatie die 'orde' vertoont, omdat ze het tegendeel bevat van willekeur (bijvoorbeeld alle deeltjes op hetzelfde niveau). Een meer waarschijnlijke toestand daarentegen is gekenmerkt door het ontbreken van regelmaten of patronen. Entropie is dus een maat voor wanorde.

Door de abstracte vorm waarin het begrip entropie aanvankelijk zijn intrede deed, drong de diepere betekenis ervan slechts moeizaam door tot een publiek van niet-specialisten. De Boltzmann-interpretatie leent zich beter voor een goed begrip. Entropie drukt wanorde uit; de tweede wet van de thermodynamica zegt dat het heelal steeds wanordelijker wordt. In het rijk van de science fiction literatuur was het vooral Philip Dick die onder de indruk van het begrip entropie kwam. In zijn roman 'Do Androids Dream of electric Sheep?' voert hij het begrip 'kipple' in om entropie te beschrijven. Kipple is het geheel van onbruikbare voorwerpen, rommel, waardeloze spullen in de wereld. 'When nobody's around, kipple reproduces itself... the universe is moving towards a final state of total, absolute kippleization.'

Laat ons nog even terugkomen op het probleem van de geldigheid van de tweede wet. Welke waarde moeten we hechten aan een wet die geregeerd wordt door het toeval, een wet die niet noodzakelijk is, maar alleen waarschijnlijk? Laten we eerst de betrouwbaarheid ervan nagaan aan de hand van een eenvoudig voorbeeld.

Beschouwen we een doos met daarin honderd biljartballen, vijftig witte, vijftig rode. De ballen liggen netjes gerangschikt, alle rode links en alle witte rechts. We schudden de kist en bekijken de inhoud opnieuw. De biljartballen hebben zich herschikt en liggen nu onvermijdelijk door elkaar gemengd. Deze nieuwe toestand van wanorde is waarschijnlijker dan de aanvankelijke ordening en correspondeert met een hogere entropie. Schudden we de kist opnieuw, dan blijft er wanorde heersen, ook al verschuiven de posities onderling voortdurend. De entropie is in deze toestand maximaal en verandert niet meer. We hebben een evenwichtsverdeling. Laat ons nu blijven schudden. We schudden zonder ophouden uren, dagen, jaren aan één stuk en observeren ondertussen de toestand in de kist. We stellen vast dat de configuratie van de ballen altijd maar verandert; alleen het toeval bepaalt wat de volgende schikking zal zijn. Maar altijd zal er volstrekte wanorde heersen, geen regelmaat of vast patroon van rood en wit. Tenzij wellicht zeer uitzonderlijk. Het kan gebeuren, maar het is extreem zeldzaam, dat de oorspronkelijke toestand — alle rode links en witte rechts — zich nog eens manifesteert. Zuiver toe-

vallig. En als het gebeurt, zal het zeer kortstondig zijn want onmiddellijk verdwijnt de orde weer en keert wanorde terug.

Orde in de kist lijkt moeilijk te realiseren. Kijken we nauwkeuriger toe dan stellen we wel vast dat op kleinere schaal enige ordening gemakkelijker optreedt. Het is allicht mogelijk dat zich op een bepaalde plaats en op een bepaald ogenblik vijf, of zelfs tien ballen van dezelfde kleur groeperen. Hoe groter het aantal, hoe kleiner de kans daartoe. Het spontaan ontstaan van orde binnen een systeem hangt nauw samen met het aantal deeltjes waaruit het systeem bestaat. Voor kleine aantallen is een zekere mate van regelmaat gemakkelijk mogelijk, maar bij grote aantallen wordt elke bijzondere situatie buitengewoon zeldzaam. Kleine fluctuaties die afwijken van de gemiddelde toestand treden voortdurend op, maar als het totaal aantal deeltjes groot is, worden deze fluctuaties volstrekt onbetekenend en beïnvloeden zij niet meer het globale uitzicht.

Naar thermodynamische maatstaven zijn honderd biljartballen in een doos een systeem dat uit een zeer klein aantal deeltjes bestaat. De systemen waarover men in de thermodynamica spreekt zijn doorgaans de voorwerpen die we met onze zintuigen waarnemen, en de deeltjes zijn de atomen of moleculen waaruit deze zijn opgebouwd. Voor een besef van de orde van grote kan één voorbeeld volstaan: één liter water bevat 3×10^{25} moleculen H_2O. Zelfs het kleinste dingetje zichtbaar met het blote oog bevat een onvoorstelbaar aantal atomen, vele triljoenen.

De kans dat zich in deze enorme aantallen spontane ordeningen voordoen op een waarneembare schaal, is volstrekt uitgesloten. Mathematisch is deze kans wel niet exact gelijk aan nul, maar zij is zo onvoorstelbaar klein dat we er niet in het minst rekening mee hoeven te houden.

Laat ons in plaats van biljartballen, moleculen beschouwen. We mengen een hoeveelheid water met alcohol in een beker en schudden het mengsel zodat een homogene oplossing ontstaat, die we dan ongestoord laten staan. Onzichtbaar voor het oog worden de moleculen in de roerloze vloeistof nog steeds door de thermische bewegingen geschud. Ondanks deze voortdurende agitatie verliest de oplossing nooit iets van haar rust en gelijkmatigheid. Op geen enkel ogenblik zullen we vaststellen dat alle watermoleculen terecht komen aan de ene kant, de alcoholmoleculen aan de andere kant. Ook niet voor heel even. Ook niet als we langer kijken dan de leeftijd van het heelal. (Die ontmenging doet zich wel voor bij water en olie, maar dat komt omdat die onderling onoplosbaar zijn en zich dus niet laten mengen. De zwaartekracht trekt dan de zwaarste vloeistof (water) naar onder.)

Het homogene mengsel bezit de hoogste entropie. Het is in evenwicht. Hoewel de atomaire bewegingen doorgaan, verandert er niets meer aan de macroscopische structuur van de vloeistof. Een spontane

scheiding is niet meer mogelijk. Omgekeerd, als de stoffen in eenzelfde vat voorkomen maar nog gescheiden zijn, zoals het geval was toen de alcohol bij het water gevoegd werd, zal wel spontane menging optreden. De entropie stijgt daarbij.

De geldigheid van de tweede wet van de thermodynamica mag dan niet absoluut zijn; in werkelijkheid zal er nooit een afwijking van betekenis worden geconstateerd. We kunnen echter nog verder gaan: de tweede wet is de zekerste natuurwet die we kennen. Er is reden om aan te nemen dat deze wet de enige is waarvan we volstrekt zeker kunnen zijn.

De wetenschap steunt op een aantal wetten waarmee de waargenomen natuurverschijnselen beschreven en begrepen kunnen worden. De beweging van de planeten rond de zon volgt uit de gravitatiewet van Newton en de traagheidswet van Galilei. De voortplanting van het licht volgt uit de wetten van het elektromagnetisme van Maxwell. De chemische eigenschappen van een atoom zijn gebaseerd op de wetten van de quantummechanica. Al deze wetten steunen niet op een onderliggende logica, maar werden als zodanig ontdekt. Het geloof erin is gebaseerd op de vaststelling dat ze effectief in staat zijn een groot aantal verschijnselen op samenhangende wijze te verklaren. Maar de geschiedenis van de wetenschap leert dat naarmate meer kennis wordt opgedaan in meer verschillende omstandigheden, deze wetten kunnen sneuvelen. Ook de meest betrouwbare. Zo moest de gravitatiewet van Newton vervangen worden door de algemene relativiteitstheorie van Einstein, ondanks de onschatbare diensten die zij eerder bewezen had. De quantummechanica kwam in de plaats van de klassieke mechanica. Geen enkele natuurwet is veilig voor latere herroeping.

Behalve de tweede wet van de thermodynamica. Deze steunt immers wél op een logica, zelfs op een evidentie. Essentieel zegt de tweede wet dat wat zich naar alle waarschijnlijkheid zal voordoen, de toestand is met de grootste waarschijnlijkheid. Dit is niet alleen logisch, dit is vanzelfsprekend. Begrepen vanuit de statistische mechanica is de tweede wet van de thermodynamica zo eenvoudig en evident dat ze bijna overbodig wordt. Met deze wet lijkt het klassieke ideaal van de wetenschap verwezenlijkt: een onomstotelijke, eenvoudige waarheid in elegante formulering. In zijn 'The Nature of the Physical World' schreef Sir Arthur Eddington: 'The law that entropy always increases — the second law of thermodynamics — holds, I think, the supreme position among the laws of Nature'.

Brengen we in herinnering: volgens de tweede wet van de thermodynamica neemt de entropie, en dus de wanorde, van elk systeem onomkeerbaar toe. Mechanische energie zet zich om in warmte, warmte plant zich voort van hoge naar lage temperatuur, chemische stoffen mengen zich met elkaar; alle structuur en verscheidenheid in de natuur wordt afgebroken. Overal stijgt de entropie en overal nivelleert deze entropie de verschillen.

Als de entropie van een systeem haar maximale waarde heeft bereikt houdt de evolutie op: er is dan evenwicht. Er is dan geen structuur meer, enkel homogene warmte en wanorde. Onveranderlijk, stabiel, eeuwig en dus dood.

De natuur gaat in haar geheel, zoals elk levend wezen afzonderlijk, een onontkoombare dood tegemoet. Dat is de fataliteit van de tweede wet.

Dat is het antwoord op de vraag naar het spontane gedrag van de materie die we ons stelden. Waar een systeem aan zichzelf overgelaten evolueert onder invloed van de krachten in zichzelf aanwezig, zakt het onverbiddelijk weg in een toestand van maximale entropie. Een toestand van evenwicht. De evidentie van de tweede wet sluit uit dat we ons vergissen. Waarnemingen van de meest uiteenlopende fysische en chemische processen bevestigen dat we ons niet vergissen. Overal stijgt de entropie. Alles is een onvermijdelijk afglijden, een onomkeerbaar verval.

En uit deze onafwendbare puinhoop richt het leven zich op. Over de hele lijn spreekt het alles tegen. In ontelbare gedaanten groeien en bewegen de levende wezens over het aardoppervlak, diversifiëren en organiseren zich, en bouwen alsmaar ingewikkelde structuren op. Het zijn wezens die de moleculen in hun weefsels manipuleren en het eigen lichaam hanteren, dwars tegen de tweede wet in. Niets is een onwaarschijnlijker combinatie van atomen dan een vogel die door de lucht zweeft, maar het leven op aarde spot met de tweede wet en stuurt miljoenen vogels het luchtruim in. In plaats van een afglijden naar homogeniteit en evenwicht zorgt het leven voor groei en metamorfose, voor toenemende vormen en structuren, voor complexiteit en individualiteit.

Uit de veroordeelde materie ontstonden de levende wezens die het evenwicht weigeren dat de natuur hen voorstelt en die door hun activiteiten de hele aarde uit evenwicht rukken. Maar deze wezens hebben angst voor het evenwicht, dat de dood is, en voor entropie, de weg er naartoe.

10

Open systemen

Als een systeem de buitenwereld bij de eigen ontwikkeling betrekt, ontstaan nieuwe en ongekende mogelijkheden. De prijs voor elke verandering, de toename van entropie, kan dan door de omgeving betaald worden.

De wetenschap van de negentiende eeuw voegde een nieuwe dimensie toe aan de natuur: tijd. Niet de monotoon afrollende tijd die reeds een rol speelde in de klassieke mechanica en die slechts een automatisme is waarin alles zichzelf herhaalt, maar de tijd als bron van nieuwigheid, de tijd als scheppende kracht. Het klassieke statische heelal van eeuwig wentelende planeten en onslijtbare substanties werd vervangen door een evoluerend heelal waarin uit elke bestaande orde een nieuwe groeit, anders dan alles wat eerder bestond.

Darwin en Boltzmann

In 1785 had James Hutton in zijn *Theory of the Earth* reeds de opvatting verdedigd dat de reliëfvormen van het aardoppervlak het gevolg zouden zijn van een langzame evolutie onder invloed van vulkanisme en erosie, maar zijn ideeën ondervonden nog grote weerstand. Algemeen werd het bijbelse Genesis-verhaal aangezien als de ware ontstaansgeschiedenis van de aarde. Geen evolutie, maar een eenmalige schepping gevolgd door zondvloed-catastrofen zouden de aarde gevormd hebben zoals zij zich nu aan ons presenteert. Het was pas met de verschijning van *The Principles of Geology* in 1830 dat Charles Lyell de idee van een geologische evolutie aanvaardbaar maakte voor de meeste wetenschapsmensen en zelfs voor het brede publiek.

Ondertussen breidde de idee van een geleidelijke evolutie zich uit van de stenen aarde naar de levende aarde, een veel gewaagder ontwikkeling.

Uit de rotslagen werden fossielen blootgelegd die samengevoegd

werden tot een geschiedenis van het leven op aarde. De kennis van de hedendaagse fauna en flora nam aanzienlijk toe, vooral onder invloed van expedities die werden ondernomen tot in de uithoeken van de wereld. Uit het onderzoek kwam een beeld te voorschijn dat schokkend was en nog moeilijker te aanvaarden dan eertijds de copernicaanse degradatie van de aarde tot planeet van de zon. Het leven op deze planeet is er niet altijd geweest en het is niet in één klap geschapen, zo bleek. Alle biologische soorten, de mens inbegrepen, zijn ontstaan uit primitievere soorten door een lange en langzame evolutie.

De idee van een biologische evolutie kende een moeilijke geboorte. Hoewel het bijna onmogelijk is een systematische classificatie van planten en dieren uit te voeren zonder begrip van de evolutie die deze soortenrijkdom voortbracht, weigerde zelfs de grote taxonoom Linnaeus de idee ook maar onder ogen te zien. Georges Cuvier, ontdekker van het vliegend reptiel pterodactylus en de grote 19de eeuwse autoriteit op het gebied van fossielen, verwierp resoluut de idee van een evolutie. Cuvier geloofde in de catastrofe-theorie van Bonnet en nam aan dat het leven na elke zondvloed opnieuw geschapen werd. Nieuwe levensvormen kwamen, volgens hem, na zo'n catastrofe in de plaats van de oude die voorgoed onder het puin van de voorgaande periode begraven waren.

Maar in 1809 publiceerde J. Lamarck zijn *Philosophie zoologique*, waarin hij zijn denkbeelden over de evolutie van het leven uiteenzette. Ongelukkig genoeg was Lamarck's uitgangspunt onjuist. Hij nam aan dat een diersoort geleidelijk aan nieuwe eigenschappen verwerft onder invloed van de gedragingen en omstandigheden in de loop van z'n leven. Giraffen bijvoorbeeld zouden zijn ontstaan uit primitieve antilopen die aten van de bladeren van de bodem en daartoe voortdurend hun nek moesten strekken. Het vele reikhalzen, generaties aan een stuk, zou dan hebben geleid tot een lange nek, poten en tong. Kortom, tot een giraffe. Het lamarckisme werd uit alle hoeken heftig aangevallen en verguisd, onder meer doordat ervaringen leerden dat tijdens het leven verworven eigenschappen niet erfelijk zijn en het nooit worden. Hoewel hij daarmee op een verkeerd spoor zat, komt Lamarck toch de verdienste toe de evolutie-idee voor het eerst vooraan in de biologische discussies te hebben geplaatst.

Het was Charles Darwin (en gelijktijdig met hem Alfred Wallace) die een beter mechanisme voor evolutie bedacht en de evolutie-gedachte definitief in de wetenschap binnenbracht. Darwin was ervan overtuigd dat er een graduele overgang is van de soorten in de loop der tijd. Hij stelde natuurlijke selectie voor als mechanisme. Een giraffe verwierf zijn lange nek niet door het vele reikhalzen van zijn voorouders, maar als gevolg van de combinatie van willekeurige variaties en natuurlijke selectie. Volgens

Darwin zijn er altijd variaties in de erfelijke eigenschappen van een soort, zoals de lengte van de nek, en als een toevallige verandering gevolgen heeft voor de overlevingskansen van het dier of de plant zullen de bezitters van de gunstige variant bevoordeeld worden. Met de langere nek kwam het boomgebladerte beter binnen bereik van de giraffe en dat verbeterde de overlevingskansen in de Afrikaanse savanna, waardoor hij ook meer nakomelingen had die de lange nek erfden. In de 'struggle for life' werden de dieren met een korte nek daarentegen systematisch benadeeld; hun aantal nam af en na voldoende tijd bleven alleen exemplaren over met lange nek.

Op deze wijze zouden alle erfelijke eigenschappen verworven worden en uiteindelijk ook nieuwe soorten tot stand komen. Er is een geleidelijke ontwikkeling, voortgestuwd door het optreden van willekeurige variaties in het nakomelingenschap, en gericht naar toenemende verbetering van de soort door de inwerking van een natuurlijke selectie waardoor de meest begunstigde individuen de meeste nakomelingen krijgen waaraan ze de gunstige eigenschap doorgeven. Het leven past zich zodoende steeds beter aan en perfectioneert zich onder druk van de uitwendige omstandigheden. Alle soorten zijn voortgekomen uit primitievere levensvormen die eraan vooraf gingen. De geschiedenis van het leven wordt op die manier een verhaal van de ontplooiing van steeds meer mogelijkheden en gedragingen; een langzame explosie van vormen en organisaties.

In 1859 publiceerde Darwin *On the Origin of Species*, waarin zijn theorie werd uiteengezet en met veel waarnemingsmateriaal gestaafd. De schokgolven die het boek uitzond doorheen de academische en kerkelijke wereld zijn tot op de dag van vandaag voelbaar. Het darwinisme sprak niet alleen het Genesis-verhaal tegen, althans de letterlijke interpretatie ervan, maar het herleidde de mens tot een dier, tot een geëvolueerde aap. Het denkbeeld was voor velen — ook voor wie niet bekommerd was om bijbelse waarheden — stuitend, weerzinwekkend en zelf onethisch.

De weerstand was aanvankelijk groot, ook onder wetenschapsmensen. Vanuit de palentologie, vergelijkende anatomie, embryologie en studies over gedrag en geografische spreiding van de soorten kwam echter zo'n overstelpende hoeveelheid indicaties te voorschijn dat vanuit wetenschappelijke hoek de uitslag nooit echt in twijfel stond. Toch was de strijd dikwijls bitter, want meestal stonden niet de feiten ter discussie maar wel zelfverzekerde en eeuwig gewaande ideologieën.

Het darwinisme zelf evolueerde nadien nog aanzienlijk. Darwin was nog niet op de hoogte van de wetten van de erfelijkheid die nadien door Mendel ontdekt zouden worden. Hij had uiteraard helemaal geen weet van de onderliggende moleculaire processen. Het neo-darwinisme incorporeerde de nieuwe inzichten van genetica en celleer in het evolutie-

concept. De oorsprong van de erfelijke variaties waarop de natuurlijke selectie kan werken, werd geïdentificeerd. Mutaties, willekeurige chemische veranderingen in de structuur van het DNA spelen daarbij een belangrijke rol. Een andere bron van eindeloze variaties zijn de altijd weer nieuwe combinaties van chromosomen die door de geslachtelijke voortplanting tot stand komen. Essentieel werd door Darwin in 1859 echter reeds de weg gewezen: de levende wezens op aarde ontplooien zich in een geleidelijk proces dat leidt naar toenemende perfectie en aanpassingsvermogen. De wijze waarop die evolutie werkt, is begrijpbaar vanuit de karakteristieke biologische wisselwerkingen en selecties tussen levende wezens onderling en hun milieu.

Wat Darwin voor de biologische wereld tot stand heeft gebracht, heeft Boltzmann willen presteren voor de levenloze, anorganische wereld. Met zijn atomaire kinetische theorie van de materie streefde Boltzmann ernaar een algemene evolutie-theorie van de materie op te stellen.

Het is de tragedie van de 19de-eeuwse wetenschap dat hij daarin geslaagd is en dat men van dat ogenblik af over twee evolutie-theorieën beschikte die elkaar flagrant tegenspraken. Er is de opgaande evolutie naar toenemende orde en complexiteit van het leven volgens Darwin, en de neerdalende evolutie van de materie naar toenemende entropie en wanorde van Boltzmann.

Luistert het leven niet naar de wetten van de materie? Zullen er voortaan twee wetenschappen ontwikkeld moeten worden, één voor de levenloze materie, en een radicaal verschillende voor de levende materie? Maar wat houdt dan de geldigheid tegen van de blijkbaar goed begrepen tweede wet van de thermodynamica binnen de levende materie? De orde binnen het leven neemt voortdurend toe, niet alleen tijdens het ontstaan en de groei van elke cel en van elk organisme maar, zoals de evolutietheorie aantoont, ook van de gehele soort en zelfs de ganse biosfeer.

Het leven organiseert de materie in ruimte en tijd op elke schaal. Binnen de cellen gedragen de moleculen zich van minuut tot minuut, van seconde tot seconde op een samenhangende en niet willekeurige wijze. Waarom neemt de entropie hier niet toe en stijgt niet de wanorde? Over de gehele aarde ontwikkelen de soorten zich in de loop van de miljoenen jaren en bouwen zij nieuwe, steeds onwaarschijnlijker structuren op. Waarom faalt de tweede wet?

Waarom faalt de thermodynamische evolutie, de enige die begrijpelijk is vanuit fundamentele principes en waarvan de geldigheid door tal van experimenten en waarnemingen bewezen is?

Laten we nog éénmaal onze buitenaardse waarnemer erbij halen. Wat zou er omgaan in de gedachtengang van een onbevooroordeelde bezoeker, die vooraf niet op de hoogte was van de toestand hier en er nu plots mee geconfronteerd wordt? Onze waarnemer had vanop zijn uitkijkpost op Mars eerder reeds de aanhoudende toestand van niet-evenwicht op aarde vastgesteld en er zich over verbaasd. Laten we hem nu een landing uitvoeren op onze planeet. Hij kan de toestand hier dan van nabij aanschouwen. Geen detail mag nog aan zijn zintuigen ontsnappen.

Onze bezoeker daalt als een meteoor neer uit de blauwe lucht en kiest voor de landing een typisch plekje, op een gematigde breedtegraad, ergens in een vlakke streek van één der continenten. Hij raakt de grond op een uitgestrekt kussen van groene vezels, doorspekt met gele knopjes op dunne wiegende stengeltjes. Hoewel de zon met vrijwel ongetemperde kracht schijnt, baadt het oppervlak van deze planeet in een diffuus licht dat de schaduwen verzacht. De atmosfeer verstrooit het zonnelicht gelijkmatig naar alle kanten.

De lucht bestaat, zoals hij had verwacht, uit een gevaarlijk en bijtend zuurstofrijk mengsel. Op lage hoogte zweven bovendien een groot aantal kleine stofdeeltjes, waarvan de samenstelling anders is dan op Mars. Het zijn voor het merendeel geen zandstofjes maar, zoals zijn instrumenten vertellen, niet-kristallijne deeltjes van uiterst complexe chemische samenstelling, hoofdzakelijk koolstofverbindingen.

Terwijl hij om zich heen kijkt, ziet hij de meest wonderlijke vormen en kleuren in het landschap. Grote zwart-wit gevlekte wezens lopen over het groene land en trekken bedaard de vezelachtige blaadjes uit de grond. De wezens verzetten traag maar behendig hun vier poten en verplaatsen zich op die manier over het terrein. Wat verder staat een meer regelmatig gevormde stenen constructie met rood dak. Een vreemd uitgedost tweebenig wezen komt in een gewaagde verticale houding uit een opening in de wand van het bouwwerk. Het springt behendig in een glimmend tuig op vier wielen. De lucht trilt plots van geronk, en het tuig schiet met verrassende vaart vooruit over een gladde weg die tot aan de horizon reikt.

Langs de baan staat een groot aantal vervaarlijk uitziende constructies, hoog en stevig ingeplant in de grond. Elk van hen heeft een lange, rechte stam als een dikke paal, die bovenaan uitloopt op een brede en weelderige, oneindig vertakte kruin. Miljoenen groene bladeren ritselen in de wind en leggen de weg in een koele schaduw. Gevleugelde wezentjes fladderen door het gebladerte alsof er op aarde geen gewicht bestaat.

Verbouwereerd kijkt onze bezoeker om zich heen. Er is te veel om te ontdekken en niets meer dat hij begrijpt. Zijn logisch opgebouwde wereld stort in elkaar. Dit kan niet mogelijk zijn!

Vóór de landing had hij zich voorbereid op wat hem te wachten zou staan. Zijn eerdere waarnemingen van het chemisch niet-evenwicht op aarde en daarop gebaseerde gevolgtrekkingen vormden een leidraad. De toestand van niet-evenwicht moet aanleiding geven tot een intense chemische activiteit aan het aardoppervlak, had hij besloten. De reacties die het gevolg zijn van de niet-evenwichtstoestand, zoals oxydaties door de vrije atmosferische zuurstof, kunnen onmogelijk worden tegengehouden. Andere reacties moeten daarom het niet-evenwicht instandhouden. Zonder vooraf te kunnen zeggen waar en op welke wijze de chemische processen zich voltrekken, kon in elk geval verwacht worden dat ze optreden. Het leek hem daarom zeker dat de aarde aan haar oppervlak een grote chemische activiteit tentoon zou spreiden.

Chemische reacties produceren echter, zoals alle niet-evenwichtprocessen, entropie. Entropie is een maat voor wanorde. Het leek hem daarom aannemelijk op aarde een bodem en atmosfeer aan te treffen in een toestand van grote chaos en desorganisatie: een kolkende massa van gas en stof verwikkeld in onophoudelijke strijd met elkaar, een bruisende brij met turbulente stromingen die alles mengen en nergens rust dulden. Hij verwachtte een planeet aan te treffen als een chemische waterval, altijd woelig en nooit het evenwicht vindend. Laaiende wanorde overal. Een chaotische heksenketel.

Er lag integendeel een grote rust over het keurige landschap.

Entropieproduktie en entropietransport

De paradox is dat juist op aarde, waar de toestand van permanent niet-evenwicht een aanhoudende intense entropieproduktie met zich meebrengt, de entropie zeer laag blijkt te zijn. Het lijkt alsof deze planeet op magische wijze voortdurend aan het onontkoombare ontsnapt.

We hebben reeds gewezen op een dualiteit die in de natuur wordt aangetroffen; de levende en de levenloze natuur gedragen zich op onderling onverzoenbare wijze. Het is geen wonder dat in de geschiedenis van de wetenschap de biologie steeds een aparte en twijfelachtige plaats heeft ingenomen. Is dit wel een wetenschap, die een fenomeen bestudeert dat niet luistert naar de elementairste regels van de wetenschap?

Er bestaat echter een mogelijkheid iets van de scherpe kanten van de onverzoenbaarheid weg te nemen. De tweede wet van de thermodynamica geldt — zo goed als de eerste wet — enkel voor gesloten systemen.

Onder een gesloten systeem verstaan we een systeem dat geïsoleerd is van de rest van het heelal doordat er massa noch energie in of uit kan. Bij een open systeem zijn dergelijke uitwisselingen wel mogelijk. Zeker voor de eerste wet — het behoud van energie — is de voorwaarde van geslotenheid evident. De totale hoeveelheid energie in een systeem kan maar constant blijven onder alle omvormingen, als er geen energie aan wordt toegevoegd of kan ontsnappen.

Ook voor de tweede wet — de toename van entropie — is een gesloten systeem echter een strikte voorwaarde. Entropie is een natuurkundige grootheid die zoals andere grootheden verplaatst kan worden. Het is mogelijk entropie in een systeem binnen te brengen, of uit een systeem af te voeren. Bij alle irreversibele processen neemt de entropie van een gesloten systeem toe, zoals we besproken hebben, omdat er entropie geproduceerd wordt door deze processen. Bij een open systeem is het echter mogelijk dat de geproduceerde entropie weer wordt afgevoerd, zodat de entropie van het systeem uiteindelijk misschien zelfs daalt! Een voorbeeld van een dergelijke mogelijkheid is het bevriezen van water.

Bij kamertemperatuur is water een vloeistof, wat betekent dat de moleculen willekeurig door elkaar bewegen. Deze toestand is gekenmerkt door een grote moleculaire wanorde, en dus hoge entropie. Als we water afkoelen zal het beneden een bepaald temperatuur bevriezen. In de kristallijne toestand nemen alle moleculen vaste plaatsen in volgens een regelmatig en ordelijk patroon. De entropie van deze toestand moet dus lager zijn dan die van het vloeibaar water. Tijdens het bevriezen is de entropie gedaald! Toch kan dit een spontaan proces zijn, zoals welbekend.

Het bevriezen van water is nochtans niet in strijd met de tweede wet van de thermodynamica. Men mag niet uit het oog verliezen dat de bevriezing enkel kon gebeuren doordat warmte aan het water werd onttrokken. Ook tijdens het eigenlijke bevriezen, wanneer de temperatuur constant op 0° C blijft, moest warmte afgevoerd worden, de zogenaamde stollingswarmte. Deze warmte verspreidt zich in de omgeving en is dus ontsnapt uit het water, het hier beschouwde systeem. Als 's winters een vijver dichtvriest, ontsnapt de stollingswarmte van het water onder de vorm van infrarode straling. Zij verlaat de vijver en zelfs de aarde en verliest zich verder in het heelal. Deze ontsnappende warmte voert entropie met zich mee. Berekent men het bedrag hiervan dan blijkt dat de hoeveelheid afgevoerde entropie groter is dan de daling van de entropie in het bevriezende water. De totale entropie-balans is dus nog steeds positief, zoals de tweede wet voorschrijft.

Bij elk spontaan lopend proces moet de entropie toenemen, maar om dit na te gaan, kan het nodig zijn de entropieverandering van het ganse

heelal in rekening te brengen. Bij een gesloten systeem neemt de entropie van het systeem zelf toe. Bij een open systeem is het de som van de entropie van het systeem en zijn omgeving die toeneemt. Als er meer entropie wordt afgevoerd dan geproduceerd, daalt de entropie van het systeem maar stijgt die van het heelal toch.

Een spontane ordening van de materie blijkt dus toch wel mogelijk. Dit moet ook wel als we ons rekenschap geven van de vele vormen van orde die we aantreffen, ook in de anorganische en extraterrestrische natuur. Sneeuwkristallen, stalactieten en diamant kunnen zich vormen in perfecte overeenstemming met de wetten van de thermodynamica. De toegenomen orde binnen een systeem gaat steeds ten koste van die van de omgeving. In elk geval blijft de tweede wet gelden doordat de toegenomen wanorde in de omgeving groter is dan de gerealiseerde orde binnen het systeem.

Het besef dat de entropieverandering van een systeem niet enkel het resultaat is van de entropieproduktie maar ook van entropietransport, opent fascinerende mogelijkheden voor het creëren van orde en structuur in de natuur. Misschien kunnen we hopen hier dan toch het geheim van het leven te raken. Levende wezens zijn immers, zonder uitzondering, open systemen. Ze nemen voedsel op uit hun omgeving en verspreiden onbruikbaar geworden stoffen opnieuw in de omgeving. Er is een constante doorstroming van materie en energie. Elke cel is een open systeem. De hele aarde is een open systeem; het zonnelicht stroomt de biosfeer binnen, infrarode afval-straling word terug de ruimte ingestuurd.

Wellicht bouwen de levende wezens en de hele biosfeer hun inwendige structuren op door op vernuftige manier veel entropie in de omgeving te stoten, weg van zichzelf, weg eventueel van de aarde.

Vrije energie

Laat ons, met het oog op de belangrijke mogelijkheden die zich lijken te openen, nader onderzoeken op welke wijzen open systemen in staat zijn orde tot stand te brengen, ondanks — of dank zij — de tweede wet.

Om op praktische wijze het gedrag van open systemen te kunnen behandelen is het nodig een nieuw thermodynamisch begrip in te voeren: de vrije energie. Indien men een open systeem processen laat uitvoeren, zoals chemische reacties, fase-overgangen van de materie, warmtetransport, enzovoort, stijgt de entropie van het heelal. De entropietoename van de omgeving is functie van de warmte-uitwisselingen met de omgeving en de temperatuur waarbij deze gebeuren, zoals in voorgaand hoofdstuk besproken. Deze warmte-uitwisselingen hangen enkel af van

de verandering van inwendige energie van het systeem en de arbeid geleverd door het systeem. Men kan nu de voorwaarde dat de entropieverandering van het heelal positief moet zijn — de tweede wet — uitdrukken in functie van de verandering van inwendige energie van het systeem, de geleverde arbeid, de temperatuur en de entropieverandering van het systeem. Hieruit volgt dan dat een bepaalde combinatie van al deze grootheden een nieuwe toestandsfunctie van het systeem vormt waarvan de waarde onder invloed van de processen erbinnen steeds moet afnemen. Dit is de vrije energie.

We zullen op deze plaats het begrip vrije energie niet nader definiëren; de geïnteresseerde lezer kan daarvoor elk handboek over thermodynamica raadplegen. We volstaan hier met de opmerking dat de vrije energie een maat is voor het vermogen van een systeem arbeid te leveren. Zoals eerder besproken, neemt dit vermogen voortdurend af tengevolge van de tweede wet. Energie degradeert, wordt warmte, en de mogelijkheid arbeid te leveren blijft in verminderde mate beschikbaar. De tweede wet van de thermodynamica kan dan ook uitgedrukt worden met behulp van het begrip vrije energie. Voor elk open systeem waarin processen optreden, geldt dat er een afname is van de vrije energie *van het systeem* en een toename van de entropie *van het heelal.* Het zijn beide gelijkwaardige manifestaties van de tweede wet.

Voor een systeem waarvan de temperatuur en het volume constant blijven, is de vrije energie F gelijk aan U - TS, zoals kan worden aangetoond. Hierin stelt U de inwendige energie van het systeem voor (de totale hoeveelheid kinetische en potentiële energie van zijn moleculen), T de absolute temperatuur en S de entropie. Aan de voorwaarde van constante temperatuur en volume zal meestal voldaan zijn voor de chemische en biologische processen die ons hier interesseren, zodat het voor ons doel het meest aangewezen is deze toestand te beschouwen. De verandering van de vrije energie dF wordt dan gegeven door de uitdrukking

$$dF = dU - TdS$$

Volgens de tweede wet van de thermodynamica moet de vrije energie bij alle spontane processen afnemen, dF moet dus negatief zijn. Een chemische reactie bijvoorbeeld zal enkel doorgang vinden indien de verandering van vrije energie die gepaard gaat met deze reactie negatief is. Zij zal niet doorgaan indien dF positief is. De vrije energie heeft een minimale waarde bekomen als de reactie ophoudt. Er is dan chemisch evenwicht bekomen.

Bovenstaande uitdrukking voor dF laat zien dat een systeem op meer wijzen ernaar kan streven zijn vrije energie te verlagen: door het verlagen

van zijn inwendige energie (dU<O) en door het verhogen van zijn entropie (TdS>O).

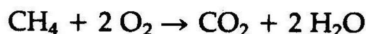
Er zijn echter nog andere combinaties van dU en dS die leiden tot een daling van F. Een reactie kan spontaan doorgang vinden onder toename van de inwendige energie als de entropie maar voldoende toeneemt of de temperatuur hoog genoeg is, zodat |TdS|>|dU| en dus dF<O. Dit doet zich voor bij processen die spontaan warmte opnemen uit de omgeving, zoals een endothermische chemische reactie, of de verdamping van een vluchtige stof. Bij dit laatste proces bijvoorbeeld moet warmte worden opgenomen, zodat de temperatuur van de omgeving soms aanzienlijk daalt (denk aan verdampende ether). Toch kan dit spontaan verlopen omdat de entropie van een gas veel groter is dan die van een vloeistof (de atomaire toestand is veel minder geordend in een gas, waar de deeltjes volkomen los van elkaar wanordelijk bewegen, dan in een vloeistof, waar ze zich dichter bij elkaar bevinden). Een voorbeeld van een endotherme reactie is de ontbinding van krijt ($CaCO_3$) in calciumoxyde (CaO) en koolstofdioxyde:



$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$$

Bij een druk van 1 atmosfeer vergt deze reactie een energie-opname van 178 joule per mol. De entropie neemt toe met 0.161 joule per kelvin (CO_2 is een gas!). Toch zal deze reactie bij kamertemperatuur (T= 294 K) niet plaatsvinden want de vrije energie neemt toe met een bedrag van 131 joule. Vanaf een temperatuur van 1100K wordt de verandering van vrije energie echter negatief, zoals men kan narekenen, en zal krijt spontaan ontbinden.

Het is ook mogelijk dat F daalt en een proces doorgang vindt onder afname van de entropie van het systeem (dS<O), als de afname van inwendige energie maar belangrijk genoeg is en als tevens de temperatuur niet te hoog is. Kortom, als de bijdrage van de inwendige energie belangrijker is dan die van de entropie: |dU|>T|dS|. Dit is het interessante geval waarbij de ordening van het systeem spontaan toeneemt. We bespraken hiervoor reeds de vorming van ijskristallen als voorbeeld van een geval waarbij een proces doorgang vindt onder daling van de entropie van het systeem. Een ander voorbeeld is de oxydatie van methaangas (CH_4) door zuurstof:



$$CH_4 + 2\,O_2 \rightarrow CO_2 + 2\,H_2O$$

Het is een exotherme reactie: de reactie maakt een energie vrij van 890 joule per mol (als het gevormde water condenseert). De verandering van

inwendige energie is dus -890 joule. De verandering van entropie is ook negatief: -0.24 joule per kelvin. Bij kamertemperatuur geldt dus dat de vrije energie afneemt met 820 joule. De reactie gaat spontaan door.

Samengevat: een reactie waarbij energie vrijkomt, zal steeds spontaan verlopen als de entropie stijgt, en bij dalende entropie enkel indien de temperatuur niet te hoog is. Een reactie die energie opneemt, kan nooit spontaan verlopen als de entropie daalt, maar wel bij toenemende entropie als de temperatuur voldoende hoog is.

Fysische en biologische orde

Het is dus mogelijk dat in bepaalde omstandigheden orde spontaan uit wanorde ontstaat. Dit verklaart waarom kristallisaties kunnen optreden en waarom machines kunnen worden gebouwd die warmte in arbeid omzetten. Steeds blijft echter gelden dat bij elke gebeurtenis de totale entropie van het heelal toeneemt.

We vragen ons nu af of de orde van levende wezens wellicht ook op deze wijze verklaard kan worden. Het zou sterk overdreven zijn te gewagen van een verklaring voor de ingewikkelde biologische organisatie indien we enkel zouden kunnen aangeven hoe een daling van entropie bekomen wordt via de hierboven aangegeven weg. Toch moet het een opluchting geven indien we zeker wisten dat de biologische processen niet in strijd zijn met de thermodynamische principes.

Helaas, zelfs zonder er exacte cijfers bij te halen, moeten we vaststellen dat het toch niet schijnt te kloppen.

Beschouwen we de fotosynthese, een der meest fundamentele biochemische processen, uitgevoerd door de planten. Bij dit proces worden water (H_2O) en koolstofdioxyde (CO_2) opgenomen en omgezet in glucose ($C_6H_{12}O_6$) en zuurstof (O_2):



$$6\ H_2O + 6\ CO_2 + \text{energie} \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\ O_2$$

Bij de fotosynthese wordt energie opgenomen onder de vorm van zonnelicht. Deze energie bevindt zich nadien voornamelijk in de moleculen van het glucose, die dan ook voor een belangrijk deel als energie-reservoirs fungeren. De fotosynthese is dus een endothermisch proces. Er is een toename van inwendige energie. Wat de entropieveranderingen betreft, de produktie van het zuurstofgas wordt ongeveer gecompenseerd door de opname van het koolstofdioxydegas, maar de vorming van de zeer geordende glucosemoleculen gaat gepaard met een aanzienlijke daling van entropie. Als echter de entropie daalt en de inwendige energie toeneemt, stijgt onherroepelijk de vrije energie.

Fotosynthese zou dus, zo bekeken, niet kunnen. Toch loopt deze reactie spontaan en op massale schaal, over de hele aarde. Maar dan wel enkel binnen de cellen van levende wezens.

De werkelijke toedracht bij de fotosynthese in een cel is echter ingewikkelder dan hier geschetst. We moeten elke conclusie daarom nog uitstellen. De fotosynthese loopt namelijk niet als een geïsoleerde chemische reactie. De hierboven vermelde reactievergelijking geeft slechts een gebrekkige en zeer onvolledige voorstelling van de gang van zaken. Zij geeft enkel begin- en eindprodukten zonder enige aanduiding hoe de omzetting gebeurt. Indien men water en koolstofdioxyde gewoon zou mengen en met zonnelicht beschijnen zou er inderdaad niets gebeuren. In een levende cel spelen er zich samen bij de vorming van de glucose echter tal van andere chemische processen af, die rechtstreeks of onrechtstreeks de vorming van glucose helpen mogelijk maken. Bij vele van deze reacties neemt de vrije energie wel degelijk af. Indien men alle reacties die de fotosynthese aandrijven in rekening brengt, dan is er wel een globale afname van vrije energie.

Dit is typisch zo voor biologische processen. Zelfs in de eenvoudigste cellen omvatten de stofwisselingsprocessen vele duizenden gekoppelde chemische reacties, waardoor de opbouw van complexe moleculen mogelijk wordt.

Alles lijkt dan toch in orde te zijn, was het niet dat we het probleem verplaatst hebben. De biochemische processen beantwoorden dan wel aan de thermodynamische principes, maar dat blijkt enkel een gevolg te zijn van hun gecoördineerd optreden. Het is door de complexiteit en de perfecte samenwerking van de vele betrokken reacties dat de syntheses doorgang kunnen vinden, waarbij de entropie sterk daalt. De vraag blijft echter bestaan. Hoe komt het dat de chemische reacties in samenwerkend verband optreden, dat zij een coherent geheel vormen als de uitgekiende onderdelen van een ingewikkelde machine, dat zij in staat zijn zichzelf te regelen, en complexe opbouwende taken te verrichten? Het is deze coherentie die de eigenlijke biologische orde uitmaakt die verklaard moet worden. Maar diezelfde coherentie is juist noodzakelijk om de orde te kunnen realiseren. Wat verklaard moet worden, presenteert zichzelf als de verklaring. We zitten in een cirkelredenering, die niets meer verklaart.

De thermodynamica van open systemen laat toe in te zien dat ondanks de schijn van het tegendeel, het leven niet zondigt tegen de tweede wet van de thermodynamica. Maar dat is een schraal gegeven. Het verklaart niet veel.

We zijn op de weg naar begrip van wat leven is, misschien iets, maar niet veel, gevorderd.

11

Spontane zelf-organisatie

Een levend wezen bevindt zich niet, zoals een kristal in evenwicht met zijn omgeving. Ook de orde van het leven is niet die van een kristal, maar van een complexe dissipatieve structuur, functioneel, eigenzinnig en essentieel onvoorspelbaar.

Er bestaat geen echt conflict tussen wat wetenschappelijk bekend en begrepen is over het gedrag van de materie, en wat wordt vastgesteld over de werking van het leven. Alle moleculen in het protoplasma respecteren de regels van de scheikunde, en geen wet van de thermodynamica wordt door het organisme geschonden. Maar eerder dan deze wetten willoos te volgen, spelen de levende wezens ermee op hun eigen manier.

Wat de klassieke natuurkunde niet vermoedde dat mogelijk was, heeft het leven gerealiseerd: nieuwe initiatieven nemen binnen de vrijheid die de natuurwetten laten. Er is ruimte tussen de strakke regels voor eigen scheppingen. Dat is wat door de levende wezens ontdekt werd.

Kristallen en levende wezens

Waaruit komt de vrijheid die het leven tentoon spreidt, voort? Is er een hiaat in de natuurwetten?

De thermodynamische beschouwingen van het voorgaande hoofdstuk lieten toe in te zien dat een levend wezen een buitengewoon ordelijke en onwaarschijnlijke toestand van de materie is. Het is een toestand van orde en lage entropie, als bij een kristal. Maar kristallen en organismen zijn geen analoge verschijnselen. Integendeel, niets in de natuur is meer tegengesteld dan een kristal en een levend wezen.

De orde die heerst binnen een kristal is gekenmerkt door een grote regelmaat in de rangschikking van de atomen. De orde die we aantreffen in een levend wezen is gekarakteriseerd door een gerichte doelmatigheid in het functioneren van de atomen. In een natriumchloride kristal herken-

nen we een perfect patroon van opeenvolgende natriumatomen en chlooratomen, maar in de opbouw van een DNA molecule is op het eerste gezicht veel minder orde te herkennen. De volgorde van de basen in deze molecule vertoont geen regelmaat, geen symmetrie en geen duidelijk patroon. De orde van een DNA blijkt pas uit het functioneren van de molecule. Alleen daaruit kan worden afgeleid dat de structuur ervan niet willekeurig is.

De orde in een kristal is die van een geometrisch patroon, gemakkelijk herkenbaar door eenvoudige waarneming. De orde in een DNA is functioneel. Zij komt pas aan het licht binnen de omgeving zelf van een levende cel, waar zij gelezen en begrepen wordt, zoals de orde in de volgorde van de letters in een geschreven tekst slechts herkenbaar is en betekenis krijgt voor wie in staat is de tekst te lezen.

Het begrip entropie is te ruw om dit onderscheid tussen beide vormen van orde tot uitdrukking te brengen. Wat wordt aangegeven door de aanduiding 'lage entropie van een systeem' is niet meer dan dat de toestand van het systeem een lage waarschijnlijkheid bezit door zuiver toeval tot stand te komen.

Het onderscheid tussen een kristal en een organisme is er ook een van bestaanswijze. Een kristal is passief en onveranderlijk; het moet niet gevoed of onderhouden worden; het is blijvend. Als steen. Een levend wezen is in voortdurende verandering en dient zichzelf op actieve wijze in stand te houden. Er is een voeding nodig, als bij vuur, alleen dan kan de structuur gehandhaafd blijven. De substanties waaruit een levend wezen is opgebouwd, verblijven niet definitief binnen z'n structuren. Alles wordt voortdurend vervangen. Alles is in doorstroming. Alleen de vorm blijft, en ook die evolueert. Een kristal is een structuur in evenwicht. Een levend wezen verkeert in een toestand van permanent niet-evenwicht.

Een ijskristal vormt zich zodra de temperatuur van het water onder 0° C daalt. Zolang deze toestand bewaard blijft, bestaat ook het kristal. Er is verder niets nodig om de structuur in stand te houden. Het kristal is stabiel. Een levend wezen bezit nooit deze verzekerde toekomst. Het moet constant in de bres staan voor het eigen voortbestaan, voedsel vinden, opnemen, verteren, ademen, stoffen afscheiden. Zodra het deze activiteiten stop zet, sterft het. Een kristal kan niet sterven. Het kan smelten als de temperatuur stijgt, maar zodra opnieuw aan de voorwaarde van voldoende lage temperatuur voldaan is, keert het terug. De dood van een levend wezen is onherroepelijk.

Voor een kristal is de omgeving het medium waaruit het werd gevormd en waarin het wordt bewaard, veilig en onbedreigd. De kristallisatie gebeurde omdat die noodzakelijk was. Voor het leven is de omgeving echter steeds een bedreiging. Het bestaan van levende wezens werd niet

gevraagd door de stoffen die het zullen voeden, het werd nooit aanvaard door de natuur. Elk levend organisme moet vechten voor z'n bestaan. De overwinning is nooit gegarandeerd. Vrede wordt pas gesloten als het lichaam zich overgeeft en sterft. Rust en evenwicht keren dan in de substanties terug.

Het ontstaan van kristalstructuren kan verklaard worden door het streven van de natuur naar minimale vrije energie. Het ontstaan van levende structuren is hier hoogstens mee in overeenstemming maar kan er niet door verklaard worden, zoals we besproken hebben. Bij de vorming van een kristal wordt entropie afgevoerd en in de omgeving verspreid. Eenmaal gevormd, stopt de produktie van entropie want het evenwicht werd bereikt. Een levend wezen is het toneel van voortdurende chemische reacties en produceert onophoudelijk en aan hoog tempo entropie. Het moet deze entropie in hetzelfde tempo ook weer in de omgeving uitstoten onder de vorm van warmtestraling en afvalstoffen. Levende wezens bouwen zich op en houden zich in stand door hun omgeving af te breken.

In onze poging voor het verschijnsel van het leven een wetenschappelijke uitleg te vinden, hebben we de paradox vergroot. De orde die we in de natuur aantreffen, zowel in een kristal als binnen een levende cel, is het resultaat van een daling van entropie. Voor een kristal is dit eenvoudig te begrijpen, zoals besproken in het voorgaande hoofdstuk. Levende wezens echter zijn uitgesproken niet-evenwichtsstructuren en dus het toneel van irreversibele processen. Alle irreversibele processen produceren onvermijdelijk entropie. Hoe is het te begrijpen dat we juist dààr zo'n grote orde aantreffen, waar de grootste wanorde wordt geproduceerd?

Niet-evenwichtsthermodynamica

De klassieke thermodynamica, de enige die hier tot nog toe ter sprake kwam, hield zich bijna uitsluitend bezig met systemen in een toestand van thermodynamisch evenwicht. Onder thermodynamisch evenwicht verstaan we een toestand van zowel mechanisch, thermisch als chemisch evenwicht, een situatie dus die in geen enkel opzicht nog naar verandering neigt.

Een systeem in thermodynamisch evenwicht kan beschreven worden door een aantal grootheden die de macroscopische eigenschappen van het systeem weergeven, zoals druk, volume, temperatuur, chemische samenstelling, inwendige energie en entropie. Dit zijn de zogenaamde thermodynamische coördinaten. Bij evenwicht zijn deze thermodynamische coördinaten niet afhankelijk van de tijd; ze hebben alle een constante

waarde. Men kan in theorie processen beschouwen die verlopen bij thermodynamisch evenwicht. Deze dienen dan zeer traag te verlopen of op zodanige manier dat alle grootheden zich voortdurend kunnen aanpassen aan de nieuwe toestand en dat het systeem op elk ogenblik in evenwicht blijft. Dergelijke processen verlopen reversibel, omdat vanuit de altijd heersende evenwichtstoestand steeds even goed terug naar de voorgaande als naar de volgende evenwichtstoestand kan worden gegaan. Deze reversibele processen produceren geen entropie.

Wanneer aan de voorwaarde van evenwicht niet voldaan is, zal het systeem evolueren doorheen een aantal opeenvolgende toestanden die niet meer door de thermodynamische coördinaten beschreven kunnen worden. De processen verlopen nu irreversibel, dit betekent, met toename van entropie.

Men kan dergelijke niet-evenwichtstoestanden strikt genomen niet meer op thermodynamische wijze behandelen aangezien een aantal grootheden zelfs niet meer gedefinieerd kunnen worden. Het begrip temperatuur bijvoorbeeld is in de thermodynamica nauwkeuriger gedefinieerd dan in het dagelijkse leven waar het niet veel meer is dan een bepaalde gevoelsgewaarwording. In de thermodynamica is temperatuur een grootheid die verband houdt met de gemiddelde energie van de deeltjes binnen een systeem, op voorwaarde dat dit systeem een toestand van evenwicht heeft aangenomen. Deze voorwaarde is essentieel. Dit neemt niet weg dat het in de praktijk dikwijls toch wel mogelijk is thermodynamische beschouwingen toe te passen op niet-evenwichtssystemen. Dit kan door te onderstellen dat lokaal evenwicht heerst. Zelfs indien het systeem zich globaal genomen niet in evenwicht bevindt, kan dikwijls in goede benadering worden aangenomen dat in kleine onderdelen ervan nog steeds evenwicht heerst. Alle thermodynamische coördinaten blijven dan defineerbaar.

De negentiende-eeuwse thermodynamica heeft zich echter nauwelijks met de niet-evenwichtstoestanden beziggehouden. Men beschouwde het niet-evenwicht als een tijdelijke en minder interessante overgangstoestand van een systeem dat op weg is naar een toestand van evenwicht. Bovendien werden interessante resultaten bekomen met de thermodynamica voor evenwichtstoestanden, die leken te bevestigen dat vooral systemen in evenwicht werkelijk de moeite waard zijn.

Zo kon heel algemeen worden bewezen dat een systeem in thermodynamisch evenwicht steeds stabiel is. In de scheikunde staat dit principe bekend als de wet van Le Châtelier. Deze stabiliteit betekent dat, wanneer men kleine storingen op het systeem uitoefent waardoor dit zich uit zijn oorspronkelijke toestand verwijdert, het systeem automatisch naar een toestand van evenwicht terugkeert. Indien bijvoorbeeld bij een mengsel

in chemisch evenwicht een produkt wordt gevoegd waardoor het evenwicht verbroken wordt, zullen spontaan chemische reacties optreden die het evenwicht herstellen. Indien men een systeem in thermisch evenwicht op een bepaalde plaats verwarmt, zullen warmtestromen optreden die het thermisch evenwicht herstellen.

Pas in de twintigste eeuw, en vooral na ongeveer 1960, ging men meer aandacht besteden aan systemen die niet in thermodynamisch evenwicht verkeren, maar waarbij nog wel lokaal evenwicht kon worden aangenomen, zodat een thermodynamische aanpak mogelijk bleef. Vooral Ilya Prigogine en zijn medewerkers van de Université Libre de Bruxelles hebben hier belangrijke en spectaculaire resultaten geboekt. Prigogine verwierf in 1977 voor zijn werk op dit gebied de Nobelprijs voor scheikunde.

Aanvankelijk richtten de onderzoekers van Brussel hun aandacht uitsluitend op systemen waarvan de toestand niet ver uit evenwicht verkeert. In dergelijke systemen treden irreversibele processen op die lineair verlopen. Nauwkeuriger uitgedrukt betekent dit dat de snelheid waarmee de processen verlopen, de zogenaamde thermodynamische stromingen, eenvoudige lineaire functies zijn van de effecten die de processen opwekken, de zogenaamde thermodynamische krachten. Voorbeelden van thermodynamische krachten zijn temperatuursverschillen, en plaatselijke verschillen in de concentratie van chemische stoffen.

Kort gezegd, de thermodynamische stromingen werden aangenomen eenvoudig evenredig te zijn met de thermodynamische krachten die ze opwekken. Onder die voorwaarden kon Prigogine aantonen dat de irreversibele processen op zodanige wijze verlopen dat zij trachten de entropieproduktie zo klein mogelijk te houden. Dit is het principe van de minimale entropieproduktie. Het komt erop neer dat de dissipatie van energie, de omzetting van arbeid in warmte, zo klein mogelijk blijft.

Het is alsof de natuur tracht haar kwaliteit zo veel mogelijk te bewaren, ook al wordt zij verplicht iets ervan in te leveren.

Nadien gingen Prigogine en zijn medewerkers systemen beschouwen in een toestand die vèr verwijderd is van evenwicht (maar waarbij nog wel lokaal evenwicht kan worden aangenomen). De lineaire betrekking tussen thermodynamische stromingen en krachten kan nu niet langer meer aangenomen worden. De evolutie-mogelijkheden voor het systeem werden daardoor veel ingewikkelder. Aanvankelijk verwachtte eigenlijk niemand hier fundamenteel nieuwe gedragingen te vinden. Het viel echter anders uit.

Al gauw bleek dat systemen in een toestand ver van thermodynamisch evenwicht niet langer het principe van minimale entropieproduktie gehoorzamen. Integendeel, zij gaan radicaal de andere kant op en

verhogen de entropieproduktie. Er is een belangrijke toename van de dissipatie van energie (omzetting van hoogwaardige energie in warmte). De verhoogde entropieproduktie kan in bepaalde gevallen spectaculair zijn en gepaard gaan met een drastische reorganisatie van het systeem. Er ontstaat een structuur die erop gericht is de geproduceerde entropie zo efficiënt mogelijk ook weer af te voeren. De geordende structuur die verschijnt, wordt dan door de aan de gang zijnde processen binnen het systeem zelf onderhouden. Een dergelijke orde, die essentieel geassocieerd is aan een dissipatie van energie, noemde Prigogine een dissipatieve structuur.

Dissipatieve structuren kunnen enkel optreden onder bepaalde voorwaarden. We zullen verderop nog de gelegenheid hebben uitvoeriger op deze voorwaarden in te gaan. Leggen we hier alvast nog eens de nadruk op een essentiële vereiste: het systeem moet zich in een bestendige toestand van niet-evenwicht bevinden. Er moet dus belet worden dat het vanzelf naar de evenwichtstoestand evolueert. Dit zal steeds een ingreep van buitenuit vergen. Aan zichzelf overgelaten zouden de processen die zich voltrekken onder invloed van het niet-evenwicht, een terugkeer naar evenwicht bewerkstelligen. Enkel actief ingrijpen van buitenuit kan dit verhinderen. In een reagerend chemisch mengsel bijvoorbeeld, moeten daartoe voortdurend zekere stoffen aangevoerd, en andere afgevoerd worden, zodat de reacties aan de gang kunnen blijven. In een systeem dat zich uit thermisch evenwicht bevindt, moet op de ene plaats blijvend verwarmd en op de andere plaats afgekoeld worden, zodat warmte permanent kan stromen.

In elk geval dient het systeem open te zijn. Materie, energie of beide moeten toegevoegd en afgevoerd kunnen worden. Entropie moet steeds afgevoerd worden. Binnen een gesloten systeem kunnen geen dissipatieve structuren optreden.

De idee wint meer veld om de georganiseerde, open, niet-evenwichtssystemen die de levende wezens zijn, als dissipatieve structuren op te vatten. Is daarmee het theoretisch kader gevonden waarbinnen het leven begrepen kan worden? Laten we niet vooruit lopen; een antwoord kan in dit stadium niet gegeven worden. We moeten eerst het concept van de dissipatieve structuur nader onderzoeken.

Cellen van Bénard

Dissipatieve structuren zijn niet zeldzaam. We treffen ze aan op alle gebieden waar de omstandigheden belet worden spontaan naar een evenwicht te evolueren. Laten we een eenvoudig voorbeeld bespreken.

We beschouwen een brede pan met platte bodem, gevuld met een vloeistof in rust. Aan zichzelf overgelaten neemt de vloeistof snel een homogene verdeling aan. In al haar delen is ze gelijk aan zichzelf. De homogeniteit geldt voor alle eigenschappen van de vloeistof; overal zullen dichtheid, samenstelling en temperatuur dezelfde zijn. Er heerst binnen de vloeistof wat men noemt een perfecte symmetrie van de ruimte. Waar men ook meet, overal zijn de karakteristieken gelijk. Dit is evenwicht. Een waarnemer die in staat zou zijn de individuele moleculen van de vloeistof te observeren, zou daar een grote chaos vaststellen. Overal bewegen de deeltjes in willekeurige richtingen met willekeurige snelheden door elkaar. Het aantal botsingen in deze wanorde is enorm groot. De gemiddelde snelheid van de moleculen blijft echter wel constant. Deze gemiddelde snelheid is ook overal dezelfde; zij bepaalt de temperatuur van de vloeistof.

We warmen de pan nu langs onder op. De temperatuur van de vloeistof wordt dan onderaan hoger dan bovenaan. De gemiddelde moleculaire snelheden neemt onderaan overeenkomstig toe. Er is nu geen thermisch evenwicht meer. Tengevolge van het temperatuursverschil is er een warmtestroom doorheen de vloeistof van onder naar boven, waardoor deze onderaan weer afkoelt en bovenaan opwarmt. Het systeem neigt dus opnieuw naar een homogene temperatuur. Dit is het normale streven van de natuur naar evenwicht.

We houden echter het thermisch niet-evenwicht in stand door onderaan blijvend op te warmen. De warmte zal dan ook blijvend door de vloeistof stromen. We hebben nu te maken met een open systeém, want er wordt aan één kant voortdurend warmte toegevoegd, terwijl aan de andere kant wordt afgekoeld zodat een constant temperatuursverschil blijft bestaan, ondanks de warmtestroom die de temperaturen gelijk tracht te maken.

Als het verschil in temperatuur niet te groot is zal het warmtetransport gebeuren door eenvoudige thermische geleiding. Door onderlinge botsingen dragen de 'warme' moleculen onder in de vloeistof iets van hun grotere kinetische energie af aan de 'koele' moleculen bovenaan, die daardoor ook opwarmen. Op die wijze plant de warmte zich langzaam en moeizaam voort. Zolang de warmte zich door dit proces van geleiding naar boven verspreidt, is de hoeveelheid getransporteerde warmte per tijdseenheid evenredig met het temperatuurverschil. Dit is wat steeds geldt wanneer een systeem niet te ver uit evenwicht verkeert: de thermodynamische stromingen (hier de warmtestroom) zijn evenredig met de thermodynamische kracht (hier het temperatuursverschil). Vergroten we het verschil in temperatuur, dan zal er ook meer warmte stromen.

Laten we nu het temperatuursverschil nog groter maken door onder-

aan meer warmte toe te voegen of door bovenaan sterker af te koelen. Aanvankelijk gebeurt er niets opmerkelijks; de warmtestroom neemt in evenredigheid toen, dat is alles. Vanaf een zekere kritische waarde van het temperatuursverschil zal echter plots een nieuwe wijze van warmtetransport optreden. De vloeistof komt nu in zijn geheel in beweging. Door de warmte-uitzetting is het soortelijk gewicht van de vloeistof onderaan kleiner dan bovenaan, en zij stijgt op. Dit is een gevolg van het principe van Archimedes. De warme en lichtere vloeistof stijgt terwijl de koelere en zwaardere vloeistof bovenaan naar beneden zakt. Er ontstaat convectie. Door de opwaartse bewegingen wordt de warmte nu 'en masse' omhoog verplaatst. Het transport van warmte op deze manier gebeurt veel efficiënter dan alleen door geleiding.

Aangezien warmtetransport een entropieproducerend proces is, neemt de entropieproduktie toe. Met meer inspanning dan voordien tracht het systeem de 'onwaarschijnlijke' toestand van een temperatuursverschil weg te werken door warme vloeistof naar de koude gebieden, en koude vloeistof naar de warme lagen te brengen. De gelijkmatigheid wordt alleen belet door de gelijklopende inspanningen van de buitenwereld, die druk bezig is met aan de ene kant op te warmen, aan de andere kant af te koelen. Door alle activiteiten stijgt ondertussen de entropie van het heelal.

Er is echter meer aan de hand. De geproduceerde entropie wordt in de omgeving afgevoerd en produceert er toenemende moleculaire wanorde. De vloeistof zelf profiteert ervan om integendeel een zekere orde te verwerven. Maar dan op een andere schaal: niet op moleculair maar op macroscopisch niveau. De bewegingen zijn niet willekeurig, maar geordend in regelmatig gevormde cellen. Op bepaalde plaatsen stijgt de vloeistof op en op andere daalt zij waardoor een regelmatig patroon ontstaat waarbinnen de vloeistof een rolbeweging uitvoert. De aanvankelijke ruimtelijke symmetrie binnen de vloeistof is nu verbroken. Niet alleen zijn er temperatuursverschillen, maar men stelt bovendien vast dat de vloeistof niet op elke plaats eenzelfde beweging uitvoert: hier stijgt zij, daar daalt zij.

Wat zich gevormd heeft zijn de beroemde Bénard-cellen, genoemd naar de Franse natuurkundige Henri Bénard die er in 1901 een uitvoerige studie aan wijdde. Het fenomeen werd vooral diepgaand bestudeerd door grote namen als Lord Raleigh en S. Chandrasekhar. Bénard-cellen treden ook in natuurlijke omstandigheden op, zowel bij langs onder verwarmde gassen als bij vloeistoffen. Schapewolkjes in de atmosfeer (altocumulus) zijn een bekend voorbeeld. Ze ontstaan door condensatie van de waterdamp in de opstijgende luchtkolommen. De korrelige structuur van het zonneoppervlak, met het typische uitzicht van borrelende rijstpap, wordt

veroorzaakt door een patroon van opstijgende warme gasbellen. De banden en gordels in de Jupiteratmosfeer, die zich evenwijdig aan de equator uitstrekken, zijn Bénard-cellen die door de rotatie van de planeet zijn uitgerokken.

Het optreden van convectie in gassen en vloeistoffen wordt in elementaire cursussen fysica gewoonlijk voorgesteld als een evident en perfect verklaarbaar verschijnsel. De vloeistof is door de opwarming onderaan onstabiel geworden. De lichtste laag bevindt zich onderaan en moet dus wel opstijgen. Het verschijnsel is eerder banaal en niet van aard grote verwondering te wekken. En toch! Bekijken we het gebeuren vanuit het perspectief van de moleculen, zij die uitvoerders zijn van de actie. Zolang warmte alleen door geleiding naar boven wordt afgevoerd, bewegen de moleculen in de grootste wanorde door elkaar en dragen energie over door de vele botsingen die zich voordoen. Door het temperatuursverschil groter te maken, neemt het verschil in gemiddelde moleculaire snelheid tussen boven- en onderlaag toe. Vanaf een zeker ogenblik nemen de moleculen op grote schaal een samenhangende beweging aan. Het is alsof plots een hogere instantie de bewegingen dirigeert: op bepaalde plaatsen beschrijven biljoenen moleculen collectief een opwaartse beweging, vlak daarnaast verplaatsen even grote aantallen moleculen zich gezamenlijk naar beneden. Op de koop toe neemt het geheel op macroscopische schaal een regelmatig patroon aan. Soms verkrijgen de Bénard-cellen de vorm van lange parallelle cilinders, soms van aaneengesloten regelmatige zeshoeken zoals de cellen in een honingraat.

Hier is orde ontstaan te midden van de wanorde. Hoe worden de bewegingen van de individuele moleculen op zo grote schaal gecoördineerd? Welke orkestleider maakte van de oorspronkelijke kakofonie een harmonieuze melodie?

Bénard-cellen zijn een voorbeeld van een dissipatieve structuur. Zij zijn de manifestatie van een spontane zelf-organisatie van de materie in een toestand van niet-evenwicht. De orde die daarbij binnen het systeem gecreëerd wordt komt neer op een energieverdeling van de deeltjes die op louter statistische gronden een extreem kleine waarschijnlijkheid bezit. De kans dat zovele biljoenen moleculen toevallig gelijktijdig een samenhangende beweging beschrijven, is zo goed als gelijk aan nul. Toch kwam zij tot stand. Het niet-evenwicht is in staat het systeem een organisatie op te leggen waaraan alle moleculen deelnemen maar waarvan de aard en het gedrag niet meer van de moleculen zelf uitgaat. Er is een samenhang tussen de bewegingen van de moleculen die zich over veel groter afstand uitstrekt dan de reikwijdte van de moleculaire interacties. De moleculen kennen slechts hun eigen wanordelijk gewriemel. De orde behoort het ganse systeem toe.

In plaats van eenvormigheid en homogeniteit, is er complexiteit binnen het systeem ontstaan. Het is waar dat de complexiteit van een Bénard-cel wel zeer bescheiden is naast die van zelfs de meest eenvoudige biologische cel, maar niet een kwantitatieve vergelijking interesseert ons op dit ogenblik. Belangrijk is dat de symmetrie van de ruimte doorbroken werd en daarmee de weg geopend naar complexiteit in alle graden.

Er is een ander nogal onthutsend aspect verbonden aan het optreden van deze dissipatieve structuur. De macroscopische toestand van de vloeistof is in de letterlijke betekenis van het woord onvoorspelbaar geworden. Beschouwt men een doorsnede van de vloeistof in de pan dan zien de goed ontwikkelde cilindervormige Bénard-cellen er uit als naast elkaar liggende wervels die alternerend linksdraaiend en rechtsdraaiend zijn. Op die wijze zullen van elkaar rakende cellen de opstijgende vloeistofkolommen samenvallen aan de ene kant, terwijl aan de andere kant de dalende vloeistof contact maakt met de dalende vloeistof van de aan die kant aangrenzende cel. Telkens men de vloeistof in de hierboven beschreven toestand van thermisch niet-evenwicht brengt, zal dit patroon optreden. Dit is perfect voorspelbaar. Maar daarnaast doet zich het feit voor dat het onmogelijk is vooraf te zeggen wat de draairichting zal zijn van een cel op een bepaalde plaats. Door de koppeling van de aangrenzende cellen zijn er slechts twee mogelijkheden. Zodra de draairichting van één cel vast ligt zijn alle andere erdoor bepaald. Welke van beide mogelijkheden gerealiseerd zal worden, is echter volstrekt onvoorspelbaar.

Bij de totstandkoming van een dissipatieve structuur ontstaat complexiteit binnen het systeem, maar er is een wezenlijke onbepaaldheid verbonden aan de precieze vorm daarvan. Eenmaal de structuur gerealiseerd, ontwikkelt ze zich volgens de ingeslagen weg maar vooraf is niet uit te maken welke richting die weg zal uitgaan. Op die manier ontwikkelt zich een 'geschiedenis' binnen het systeem. De gedetailleerde toestand op een bepaald ogenblik volgt niet noodzakelijk uit de voorgaande toestanden. Dat zij eruit is voortgekomen, is een nieuw feit. En een onherroepelijk feit. Voortaan zal het systeem zich volgens deze lijn verder ontwikkelen.

Van orde naar chaos

Wat gebeurt er indien we het systeem nog verder uit evenwicht trekken? Als we het verschil in temperatuur tussen boven- en onderkant van de vloeistof verder opdrijven, zullen de Bénard-cellen zich in eerste instantie handhaven. Maar gaandeweg ontstaan er storingen in de ordelijke

stroompatronen. Experimenteel stelt men vast dat er golvingen langs de cellen optreden waarvan de structuur ingewikkelder wordt naarmate het temperatuursverschil verder toeneemt. Op de duur takelen de welgevormde cellen zodanig af dat ze nauwelijks herkenbaar zijn. De cellen worden verward en verliezen hun individualiteit. Uiteindelijk is het celpatroon volledig verloren gegaan en verkeert de vloeistof in een toestand van chaotische bewegingen. Er valt geen regelmaat meer in te ontdekken. We hebben nu een turbulente convectie.

Blijkbaar is een dissipatieve structuur een organisatie van de materie die geklemd zit tussen de structuurloze homogeniteit van het evenwicht en de chaos van een te groot niet-evenwicht. Theoretische onderzoekingen hebben licht geworpen op de wijze waarop deze verschillende regimes ontstaan.

De toestand van evenwicht is, zoals eerder gezegd, stabiel. Er kunnen zich geen dissipatieve structuren ontwikkelen. Als zich binnen de vloeistof een volume-elementje verplaatst tengevolge van een toevallige storing, dan volstaat de inwendige wrijving in de vloeistof om de beweging af te remmen en alles komt weer tot rust. Ook dicht bij evenwicht, waar de thermodynamische stromingen nog lineair evenredig zijn met de thermodynamische krachten, is er nog stabiliteit. Is de verwijdering van evenwicht echter groter dan een bepaalde kritische waarde, dan ontstaat er instabiliteit. Een in principe oneindig kleine storing, een infinitesimale fluctuatie, kan nu volstaan om de vloeistof in beweging te zetten. Deze beweging hoeft dan niet meer vanzelf te stoppen maar kan het systeem in een nieuw dynamisch regime terecht brengen.

Dergelijke oneindige kleine fluctuaties doen zich vanzelfsprekend altijd voor en het systeem zal dan ook met volkomen zekerheid in een nieuwe toestand terecht komen, een toestand die volkomen onbekend is in of nabij evenwicht. Zo ontstonden de Bénard-cellen. Toen het systeem voldoende ver uit thermisch evenwicht was verwijderd, was het onstabiel geworden. Een oneindig kleine beweging van de warme vloeistof onderaan, met haar kleiner soortelijk gewicht, volstond om aan een opstijgende beweging te beginnen. Zodra ergens een beetje vloeistof het initiatief nam, sleurde dit de rest, die al even weinig aansporing nodig had, met zich mee en er ontstond een grootschalige beweging. Zo vormde zich het ganse stroompatroon, tengevolge van een onwaarneembaar kleine fluctuatie ergens, die het systeem dat er rijp voor was, op de weg zette van de dissipatieve structuur. Prigogine spreekt in dit verband van 'orde door fluctuatie'.

Mathematisch blijkt dat er nu twee mogelijke oplossingen voor de nieuwe toestand bestaan. Bij het Bénard-probleem zijn dit de beide mogelijke draairichtingen van een cel, meer bepaald van de cel die de aanzet

gaf voor het ganse stroompatroon. Welke mogelijkheid wordt gerealiseerd, hangt enkel van de initiële fluctuatie af, dus van het toeval. Het is daar dat de onvoorspelbaarheid het systeem binnen sluipt. Oneindig kleine onzekerheden in de atomaire details van een systeem kunnen zich plots op globale schaal manifesteren. Als voldaan is aan de voorwaarde van onstabiliteit ontstaat wat men noemt een 'bifurcatie', de weg splitst zich in twee. Welke van de mogelijke wegen wordt ingeslaan, hangt enkel van het toeval af. Hier is geen voorspelling mogelijk.

Zodra de dissipatieve structuur zich goed en wel ontwikkeld heeft verkrijgt zij op zichzelf een zekere stabiliteit. Trekt men het systeem nu opnieuw verder uit evenwicht dan zal zich op een bepaald ogenblik een nieuwe instabiliteit voordoen. Opnieuw staat het systeem voor een bifurcatie. Het kiest onder invloed van inwendige fluctuaties één van beide mogelijkheden en komt in een nieuw dynamisch regime terecht, dat ingewikkelder is dan het aanvankelijke stroompatroon. Er zullen zich nu nieuwe bewegingen op de convectiecellen superponeren. Naarmate men het temperatuursverschil verder blijft opvoeren, volgen de instabiliteitsdrempels elkaar steeds sneller op en het systeem doorkruist het ene bifurcatiepunt na het andere. De bewegingen worden steeds ingewikkelder. Op de duur is in de zeer complex geworden vloeistofstromingen geen enkele regelmaat meer te bespeuren. De fysicus noemt de dan ontstane beweging turbulent; de wiskundige zegt dat chaos is ingetreden.

Chemische klokken

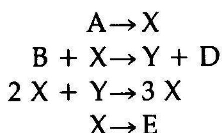
Bénard-cellen zijn een illustratie van dissipatieve structuren en lenen zich goed voor een bespreking van een aantal karakteristieke eigenschappen ervan. Daarom werden ze hier uitvoerig besproken. Dissipatieve structuren kunnen zich echter ook voordoen in systemen van totaal andere aard, zoals bijvoorbeeld bij chemische reacties. Voor ons doel zullen dergelijke structuren nog meer van toepassing zijn. Bovendien illustreren ze op treffende wijze een noodzakelijke voorwaarde voor het optreden van dissipatieve structuren die tot hiertoe hier niet nadrukkelijk genoeg tot uiting kwamen.

De processen binnen een systeem moeten niet-lineair zijn, wil een dissipatieve structuur zich ontwikkelen. Alleen dan kunnen de infinitesimale fluctuaties die de structuur op gang zetten zo versterkt worden dat ze zich op macroscopische schaal manifesteren. De mathematische vergelijkingen die de convectie in vloeistoffen of gassen beschrijven, bezitten inderdaad dit niet-lineaire karakter. We zullen ons nu echter bezig houden met chemische systemen, waarin we deze en andere essentiële ken-

merken van dissipatieve structuren duidelijk zullen herkennen.

We zullen eerst een theoretisch voorbeeld bespreken, de zogenaamde Brusselator, dat niet noodzakelijk slaat op werkelijke chemische reacties maar dat in eenvoudige vorm alle elementen bevat van wat we hier willen aantonen. De Brusselator is een schema van gekoppelde chemische reacties dat intensief bestudeerd werd door de Brusselse school van Prigogine.

We beschouwen twee beginprodukten, A en B, die zich via een aantal reactiestappen omzetten in de eindprodukten, D en E. Tijdens de omzettingen worden twee tussenprodukten, X en Y gevormd. Het zijn de concentratieveranderingen van deze X en Y in de loop van het proces die ons zullen interesseren. Het ganse processysteem kan als volgt geschreven worden:



$$A \rightarrow X$$
$$B + X \rightarrow Y + D$$
$$2\,X + Y \rightarrow 3\,X$$
$$X \rightarrow E$$

Door de eerste reactie wordt het produkt A spontaan omgezet in produkt X. In de tweede stap reageert deze X met het produkt B; dit levert de produkten Y en D op. De derde reactie gaat tussen X en Y. Twee moleculen X reageren met één molecule Y om drie moleculen X te vormen. Tenslotte zet dit produkt X zich spontaan om in E, overeenkomstig de vierde stap.

Elke reactie loopt in één richting (volgens de pijl van links naar rechts) in een tempo dat geregeld wordt door de bekende chemische wet van de massawerking. Die zegt dat de snelheid van een reactie evenredig is met het produkt van de concentraties van alle deelnemende stoffen. (Onder de concentratie van een stof verstaan we de massa van die stof per eenheid van volume). Stellen we de concentratie van een produkt voor door de naam van het produkt tussen vierkante haakjes, dan kunnen we dus stellen dat de snelheid van de eerste reactie evenredig is met [A], die van de tweede reactie met [B] [X], die van de derde reactie met $[X]^2$ [Y], en die van de laatste reactie met [X].

Zodra we de reacties in gang zetten worden produkten A en B voortdurend verbruikt terwijl D en E worden bijgemaakt. We zullen er daarom voor zorgen dat A en B in voldoende tempo worden toegevoegd en D en E worden weggenomen, zodat de reacties aan de gang kunnen blijven. We creëren hierdoor een open systeem in permanent chemisch niet-evenwicht.

Het is niet mogelijk zonder enige berekening in te zien wat gebeurt

met de concentraties van X en Y tijdens het verloop van de reacties. X wordt aangemaakt door de eerste reactie en weer weggenomen door de tweede, waardoor dan weer Y wordt aangemaakt. De interessantste stap is de derde waarbij X nog meer X maakt met behulp van Y. Dit noemt men autokatalyse. Deze autokatalyse dreigt een lawine-effect te veroorzaken met een altijd toenemende X concentratie. Daartegenover staat echter de laatste reactie die X afbreekt in een tempo dat des te groter is naarmate er meer X bestaat. Hierdoor lijkt een escalerende hoeveelheid X dan toch weer uitgesloten. Alleen berekeningen kunnen uitwijzen wat zal gebeuren.

Het is niet zo moeilijk de wiskundige vergelijkingen neer te schrijven die de veranderingen van [X] en [Y] in de tijd aangeven, met behulp van de wet der massawerking. Men bekomt op die manier twee gekoppelde niet-lineaire differentiaalvergelijkingen. Het zijn deze vergelijkingen die een niet-lineair karakter krijgen tengevolge van de autokatalyse die optreedt in de derde reactiestap. Aan alle voorwaarden voor de ontwikkeling van een dissipatieve structuur lijkt dus voldaan: we hebben een open systeem, niet in chemisch evenwicht en met niet-lineair verlopende chemische reacties. De differentiaalvergelijkingen moeten ons het verloop van de gebeurtenissen kunnen vertellen. Het is echter, helaas, niet mogelijk voor deze vergelijkingen een algemene mathematische oplossing te vinden die zou aangeven hoe groot [X] en [Y] zijn als functie van de tijd.

Eén bijzondere oplossing kan men echter wel gemakkelijk vinden. Het blijkt dat het ganse processysteem een stationaire toestand toelaat: alle reacties lopen met constante snelheid en alle stoffen hebben een constante concentratie indien $[X] = [A]$ en $[Y] = [B]/[A]$. (Men mag deze stationaire toestand niet verwarren met een evenwichtstoestand. Het systeem bevindt zich niet in evenwicht want alle reacties lopen onverminderd door maar ze doen dit met constante snelheid. Het is een toestand te vergelijken met een waterval met constant debiet. Ook hier bevindt het vallende water zich niet in evenwicht.)

Wat men bekomt in deze stationaire toestand voor de hoeveelheden van X en Y hangt dus af van de concentratie die men aanlegt van de beginprodukten A en B. Maar alleszins zijn deze concentraties constant. Het systeem gedraagt zich in deze toestand dus eerder saai.

We kunnen ons afvragen of er geen interessanter regimes mogelijk zijn. Aangezien er geen evenwicht is, zal de stabiliteit van de toestand ook niet gegarandeerd zijn. Alleen indien de stationaire toestand effectief niet stabiel is kan het systeem eruit ontsnappen om zich in een ander regime te reorganiseren. Bestaat in dit chemisch systeem het equivalent van wat de convectie-instabiliteit was in het hydrodynamisch systeem? Kan er zich een 'chemische orde' ontplooien, als de stationaire toestand onstabiel wordt?

Het is mogelijk langs mathematische weg een stabiliteitsonderzoek van de stationaire toestand uit te voeren. Hieruit volgt dat zij stabiel is indien de hoeveelheid B niet te groot is in verhouding tot die van A. Meer bepaald wordt het processysteem onstabiel zodra $[B] > 1 + [A]^2$. Wat er gebeurt met de concentraties van X en Y als de concentratie van B deze kritische waarde overschrijdt, kunnen we enkel achterhalen door de differentiaalvergelijkingen volledig op te lossen. Aangezien geen mathematische oplossing kan worden gevonden, bekomt men een numerieke oplossing met de computer. Het resultaat daarvan is opwindend. Het blijkt dat het systeem op geordende wijze begint te oscilleren. Er ontstaan wisselende concentraties van X en Y in regelmatige ongedempte schommeling.

De amplitude en periode van de schommelingen hangen niet af van de beginconcentraties van de stoffen. De oscillaties zijn eigen aan het processysteem, niet aan toevallige omstandigheden. Het systeem is nu niet langer stationair maar vertoont een cyclisch gedrag. De cyclus zelf is echter wel stabiel. We hebben te maken met een stabiel, geordend en samenhangend gedrag. Het is een dissipatieve structuur!

Chemische golven

De chemische oscillaties vormen een in de tijd geordend gedrag. De gevormde dissipatieve structuur is dus een tijdsstructuur. Ook structuren in de ruimte zijn echter mogelijk.

Tot hiertoe werd enkel een homogeen chemisch systeem beschouwd; alle stoffen waren gelijkmatig verdeeld over het beschikbare volume zodat er geen ruimtelijke concentratieverschillen zijn. Laat ons nu aannemen dat dit niet meer het geval is. We zorgen ervoor dat het volume waarin de reacties plaatsgrijpen voldoende uitgestrekt is en dat de concentratie van de stoffen A en B aan één kant van het reactiemengsel groter is dan aan de andere kant. Dan treedt er een bijkomend effect op: diffusie, de spontane spreiding van stoffen van hoge naar lage concentratie. Voor elk punt van het reactiemengsel geldt nu dat de concentraties ter plaatse veranderen onder invloed van twee processen, chemische reacties en diffusie.

Bij elk van beide differentiaalvergelijkingen moet nu een term gevoegd worden die rekenschap geeft van deze diffusie. De vergelijkingen worden daardoor mathematisch nog minder handelbaar, maar opnieuw biedt de computer een uitweg uit deze theoretische moeilijkheden. Men kan berekenen op welke wijze de concentraties van X en Y zich gedragen in de loop van de tijd en doorheen het volume van het reactiemengsel. De resultaten zijn fascinerend.

In strijd met wat de klassieke chemische thermodynamica leerde, vertoont het systeem geen neiging zich spontaan te homogeniseren en een gelijkmatig mengsel van produkten te worden. Integendeel, er vormen zich golfvormige patronen van concentratieverschillen doorheen het mengsel. De golven worden niet gedempt en houden zichzelf in stand. Ze vormen een ruimtelijke dissipatieve structuur.

Opnieuw geldt als voorwaarde voor het optreden van deze structuur dat de stationaire toestand onstabiel geworden moet zijn, hetgeen het geval is bij voldoende hoge concentratie van B. Dit komt erop neer dat het systeem zich voldoende ver uit evenwicht moet bevinden. Vanaf dat ogenblik zullen kleine fluctuaties in de concentraties van de stoffen in staat zijn de structuren in ruimte en tijd op gang te zetten.

De Brusselator is een theoretisch reactieschema. De oscillaties en golven die ermee bekomen worden, zijn computerresultaten. Zijn chemische dissipatieve structuren ook in werkelijkheid aangetroffen?

Er zijn inderdaad talrijke gevallen bekend van coherent oscillerende chemische reactiemengsels, zogenaamde chemische klokken, en van ruimtelijke patronen in reactiemengsels. Hoewel sommige daarvan reeds in het begin van deze eeuw werden ontdekt, kregen zij pas de laatste tijd de aandacht die ze verdienen. De bekendste is wellicht de Belousov-Zhabotinsky reactie. Het is een reactiesysteem met een ingewikkelder kinetiek dan die van de Brusselator maar essentieel gebaseerd op dezelfde principes: gekoppelde reacties met ergens een reactiestap die een zichzelf versterkend effect bezit.

Het was tijdens een studie van de oxydatie van malonzuur door kaliumbromaat in aanwezigheid van cerium-ionen, dat de Russische scheikundige B.P. Belousov in 1950 toevallig ontdekte dat de kleur van het mengsel op regelmatige wijze schommelde tussen geel en kleurloos. Hij voerde een gedetailleerd onderzoek uit en stuurde de resultaten naar een chemisch vaktijdschrift. Daar werd het manuscript geweigerd. De uitgever liet weten dat de ontdekking van Belousov onmogelijk was. Het werk zou enkel gepubliceerd kunnen worden indien de auteur het vergezeld deed gaan van een theoretische uiteenzetting die aantoonde dat de tot dan toe aangenomen theorieën over het verloop van chemische reacties onjuist zijn. Daarna werd het stil rond het probleem van de oscillerende chemische reacties. Belousov stak zijn resultaten in de kast.

In het begin van de jaren zestig wijdde de jonge biochemie-student A.M. Zhabotinsky zijn proefschrift aan de opheldering van de reactiemechanismen en eigenschappen van de door Belousov beschreven reactie. Het heeft echter geduurd tot de ontwikkeling van de niet-evenwichts-thermodynamica en de ontdekking van oscillerende reacties in het metabolisme van levende cellen voor de volle betekenis van Belousov's ont-

dekking doordrong. Chemische reacties moeten niet noodzakelijk monotoon verlopen zoals voordien aangenomen, maar kunnen een aanhoudend schommelend verloop kennen. Er moet ook niet noodzakelijk een homogeen mengsel ontstaan, maar onder bepaalde voorwaarden is de spontane totstandkoming van ruimtelijke patronen mogelijk.

Talrijke andere gevallen van oscillerende chemische reacties zijn sindsdien bestudeerd. Indien men werkt met gekleurde chemicaliën in een brede platte schaal kunnen de inhomogeniteiten eenvoudig met het oog worden waargenomen. Men ziet een altijd wisselend schouwspel waarin golven, krullen, soms spiralen te voorschijn komen. Al deze structuren vertonen niet de neiging zich vanzelf weer op te lossen. Door roeren van het mengsel verdwijnen ze, maar als de vloeistof weer tot rust is gekomen, keren de structuren spontaan terug. Zoals bij de Bénard-cellen is het optreden van deze ruimtelijke structuren wel voorspelbaar, de precieze vorm en uitzicht ervan kunnen echter op geen enkele manier vooraf uitgemaakt worden.

Dissipatieve structuren zijn bekend in alle domeinen van de natuurwetenschappen. We bespraken voorbeelden uit de hydrodynamica en scheikunde. Op een heel ander gebied wordt een spectaculair voorbeeld van orde binnen een niet-evenwichtssysteem geboden door de coherente straling die wordt uitgezonden door een laser. Laserlicht is een geordende toestand van elektromagnetische straling, die enkel optreedt voorbij een instabiliteitsdrempel van het stralingsveld.

De meest gevarieerde en ingewikkelde dissipatieve structuren vinden we echter ongetwijfeld binnen chemische systemen. Dit is niet verwonderlijk aangezien de niet-lineariteit in een processysteem door middel van chemische reacties op een bijna oneindig aantal verschillende manieren bekomen kan worden. In tegenstelling met de hydrodynamica of optica, waar de niet-lineariteit een gevolg is van fundamentele natuurkundige relaties en dus altijd van dezelfde vorm, komt zij bij de chemische systemen voort uit het verloop van de reacties. Aan de combinatiemogelijkheden van scheikundige reacties is geen grens te stellen. De manieren waarop autokatalyse, kruiskatalyse en activatie een chemisch processysteem niet lineair kunnen maken, zijn onbeperkt in aantal.

Het is daarom dat de verscheidenheid en complexiteit van de natuur chemisch van aard is, en niet hydrodynamisch of optisch. Het is daarom ook dat leven een chemisch verschijnsel is.

Is dat dan het nieuwe vermoeden? Moeten we het verschijnsel van het leven op aarde interpreteren als een dissipatieve structuur?

Eenmaal het idee opgevat, lijken meer en meer elementen samen te werken om het te ondersteunen. Het voorkomen van de onwaarschijnlijke en geordende structuren in de biologische context verliest iets van zijn raadselachtigheid in het licht van de theorie der dissipatieve structuren.

Nergens is ook zo duidelijk voldaan aan de voorwaarden voor het ontstaan ervan als in het milieu en het medium zelf van het leven, de biosfeer, het organisme, het protoplasma. Levende wezens en ecosystemen zijn open systemen die permanent in een toestand van niet-evenwicht verkeren. Ze zijn het toneel van een groot aantal chemische processen die veel entropie produceren en deze onder de vorm van afvalprodukten in de omgeving uitstoten. Het feit dat alle biochemische reacties gekatalyseerd worden door enzymen, die zelf het produkt zijn van deze reacties, verleent aan de biochemische reacties een uitgesproken niet-lineair karakter.

Oscillerende en golvende reacties zijn een eerder uitzonderlijk verschijnsel in de anorganische scheikunde, maar zij worden waargenomen op alle niveaus van de biologische activiteiten. Talrijke reacties in het metabolisme van levende wezens kennen een oscillerend verloop. Glycolyse, een proces van groot belang voor de energievoorziening van een levende cel, is hiervan een voorbeeld. Langs experimentele weg is vastgesteld dat de concentraties van de stoffen die deelnemen aan de reactie, ongedempte oscillaties in de tijd vertonen. Berekeningen hebben aangetoond dat dergelijke schommelingen het gevolg zijn van instabiliteiten in het systeem van gekoppelde reacties. Op een grotere schaal kan ook de aangroei van het protoplasma van slijmzwammen onder invloed van membraan-gebonden enzymen oscillerend verlopen. Het zijn voorbeelden van dissipatieve tijdsstructuren.

Maar het principe van ordening en zelf-organisatie in levende wezens strekt zich verder uit dan enkel deze voorbeelden. Het doordringt elke biologische activiteit; het is er de essentie van.

De ingewikkelde en functionele structuren binnen een cel, de morfogenese van een organisme, het samenhangend en gesynchroniseerd gedrag van een levend wezen zijn uitingen van deze spontane ordening, veel complexer dan een convectie-cel of chemische klok maar wellicht wezenlijk van dezelfde aard. In al deze gevallen wordt onder invloed van irreversibele niet-lineaire processen entropie geproduceerd en afgevoerd. Het systeem verrijkt zich aan z'n omgeving. De structuur die ontstaat, is,

hoewel niet noodzakelijk standvastig en zeker niet in evenwicht, blijvend.

Zoals van een dissipatieve structuur verwacht kan worden, bouwen de levende wezens complexiteit en geschiedenis op in een milieu waarin anders slechts homogeniteit en monotonie zou heersen. Maar bovenal, het niet-deterministisch, onvoorspelbaar gedrag van het leven, dat steeds op zo flagrante wijze in conflict kwam met wat de wetenschap voorhield voor het gedrag van de materie, zou kunnen passen binnen het theoretisch raamwerk van de theorie der dissipatieve structuren. Als reeds onbepaaldheid heerst in de simpele structuur van een Bénard-cel of in de oscillerende Belousov-Zhabotinsky reactie, hoeveel groter moet die dan niet zijn in de complexe biologische dissipatieve structuren? Hoeveel bifurcaties heeft het leven in z'n lange evolutieweg niet achter de rug? Bij elk daarvan moest een beslissing genomen worden waarvan de uitslag op geen enkele wijze besloten zat in de heersende toestand maar die nadien strikt gerespecteerd zou worden.

Als dissipatieve structuur kan het leven zijn wat het is: dynamisch, gevarieerd en onvoorspelbaar.

Is dat het geheim van wat deze aarde doormaakt? Is de biosfeer een planeetomspannende hypercomplexe chemische dissipatieve structuur in ruimte en tijd? Is leven 'orde door fluctuatie'? De elementen om deze vragen bevestigend te beantwoorden lijken aanwezig.

Het bankje onder de oude boom roest weg terwijl de boom zelf bloeit en niet van plan is te wijken voor weer en wind. Ik geef toe, we beschikken nog steeds niet over een theorie die het gedrag van de boom verklaart. Alle voorgaande beschouwingen ten spijt zijn we er waarschijnlijk even ver van verwijderd als voordien. Maar toch is er iets veranderd. Er is inzicht gerezen waar voordien enkel mysterie bestond. Het noodzakelijk onverklaarbare, of zelfs het 'on-natuurlijke' van een levend wezen, is weggenomen. Al is er nog geen gedetailleerde verklaring, dan is er nu toch het besef dat het verschijnsel van het leven niet uitgesloten moet zijn omwille van zogenaamde wetmatigheden van de natuur, van welke aard ook. Of wat wellicht juister is, er is een verklaring waarom er geen echte verklaring gevonden kan worden.

Het bankje levert geen moeilijkheden op. Het is verklaarbaar. Het doet wat elk eenvoudig systeem het liefst doet: de rust zoeken van het evenwicht. Door te vervallen en te verroesten, verhoogt het de entropie van zichzelf en de atmosfeer. IJzeroxide en vermolmd hout zijn een meer waarschijnlijke en stabielere toestand in de oxyderende atmosfeer van deze planeet dan de oorspronkelijke combinatie van zuiver ijzer en glimmend hout temidden van een oceaan van vrije zuurstof. Het is daarom te verwachten dat het afbraakproces gebeurt. Hier ligt zeker geen probleem.

De boom weerstaat de bekoring van het evenwicht. Hij klimt bergopwaarts en bouwt zich een onwaarschijnlijke structuur op. Langs vele kanten wordt zijn structuur bedreigd, maar hij verdedigt zich met grote koppigheid. Zolang de aanvallen niet te sterk worden, zolang geen stormwind raast of geen vuur het hout verkoolt, houdt hij stand. Het is het wezen zelf van een dissipatieve structuur zich in stand te houden als een onwaarschijnlijke niet-evenwichtscombinatie, stabiel — tot op zekere hoogte — voor alle pogingen haar neer te halen.

In zijn hoedanigheid van dissipatieve structuur moet de boom ook een onwetmatige vorm en gedrag bezitten die ontsnappen aan elke poging tot gedetailleerde verklaring. Niets van wat hij is en wat hij doet, kan uitgelegd worden vanuit het zand en de lucht waaruit de boom zich opbouwt. Er is door de elementen, onder invloed van de doorstroming van energie, een onbestemde weg ingeslagen die zich voortslingerde in het oerwoud van mogelijkheden. Wat heeft aanleiding gegeven tot het ontstaan van deze boom of, beter gezegd, tot de verschijning van de pereboom als biologische soort, moeten allerlei chemische combinaties geweest zijn met ingewikkelde structuur in ruimte en tijd. De ontstane chemische structuur verkreeg een altijd maar onwaarschijnlijker samenstelling en slaagde erin zichzelf in stand te houden waardoor zij — letterlijk — een eigen leven ging leiden.

Het is, vanuit dit inzicht, begrijpelijk geworden dat er iets als leven bestaat, maar het wordt ook duidelijk dat we nooit in staat zullen zijn het ontstaan ervan op aarde te verklaren vanuit de pre-biotische toestand die heerste op deze planeet. Het had ook heel anders kunnen gaan.

Wat het bankje overkomt, is verklaarbaar; wat de boom doet niet.

12

Vernieuwing als logica

Het leven kent geen planmatig verloop, het schrijft zelf de geschiedenis die het doormaakt. Balancerend tussen de dood van het definitieve evenwicht en de chaos van de totale vrijheid, zoekt het een weg die nooit voordien bewandeld werd.

We hebben drie voorwaarden genoemd voor de totstandkoming van een dissipatieve structuur: het systeem moet open zijn, niet in evenwicht en niet lineair. Er is een vierde voorwaarde. Het systeem moet macroscopisch zijn. Het moet, met andere woorden, bestaan uit een zeer groot aantal deeltjes.

Een dissipatieve structuur ontstaat, zoals gezegd, door de niet-lineaire versterking van een fluctuatie. Het is daarom belangrijk dat de fluctuaties op zichzelf geen invloed hebben op het gedrag van het systeem. Die invloed mag slechts optreden na een allesoverstijgende niet-lineaire versterking. Enkel als het systeem bestaat uit een voldoende groot aantal deeltjes, waardoor de normale fluctuaties elkaar gemiddeld opheffen, kan dit het geval zijn.

Bij alle thermodynamische systemen is dit het geval omdat thermodynamica enkel betrekking heeft op systemen die bestaan uit minstens vele triljoenen deeltjes. Fluctuaties die samenhangen met een toevallig afwijkend gedrag van enkele duizenden of zelfs miljoenen atomen verdwijnen dan volkomen in het niet naast het gemiddelde gedrag van de grote meerderheid der deeltjes. Dergelijke fluctuaties doen zich altijd voor, maar zijn onmerkbaar. Dit is het domein van de thermodynamica; hier is het gedrag van de materie voorspelbaar en wetmatig.

Tenzij in omstandigheden waar een niet-lineaire versterking vat krijgt op een fluctuatie. Dan kan een abnormale afwijking als uit het niets tevoorschijn komen en zich op grote schaal manifesteren. Er ontstaat dan een toestand die in evenwichtsomstandigheden volstrekt ongewoon zou zijn. Als de toestand bovendien enige stabiliteit verwerft zodat ze gedurende een aanzienlijke tijd gehandhaafd blijft, spreken we van een dissipatieve structuur.

Leven, als complexe dissipatieve structuur, moet daarom een macroscopisch verschijnsel zijn. In de zin waarin dit hier wordt opgevat, is ook de meest minuscule bacterie nog steeds een macroscopisch systeem. Leven op atomair niveau kan niet mogelijk zijn. Op atomaire schaal hebben de fluctuaties vrij spel. Hier heerst enkel de chaos van de thermische en toevallige bewegingen. En voor zover deze door de krachten tussen de atomen en elementaire deeltjes aan banden gelegd worden, treffen we de stabiele evenwichtsstructuren van moleculen en atomen aan.

Een dissipatieve structuur is een vorm of gedrag dat kenmerkend is voor een globaal systeem. Niets ervan is in de kleinste onderdelen van het systeem terug te vinden of kan uit die onderdelen afgeleid worden.

Er bestaat een hiërarchie in het functioneren van de natuur. Tussen de verschillende niveaus is er een éénrichtingsverkeer van informatie. De macroscopische processen maken gebruik van de microscopische maar niet omgekeerd. Het water in een rivier dankt zijn eigenschappen aan de watermoleculen, maar deze laatste worden niet beinvloed door wat de rivier doet. De eigenschappen van de moleculen leren ons niets over de golven op het water of over de loop van de rivier. Deze laatste leidt een bestaan op zichzelf. Niets daarvan wordt aan de moleculen doorgegeven.

Wat plaats grijpt in de macroscopische wereld van stromende vloeistoffen of levende wezens blijft onbekend op het onderliggende niveau van de moleculen. Omgekeerd reiken de moleculaire verschijnselen wel tot het erboven liggende macroscopisch niveau waar zij ten grondslag liggen aan de gebeurtenissen daar. We kunnen er slechts over speculeren of een nog hogere sport bestaat op de kosmische ladder waar zich verschijnselen voordoen waarvan wij geen weet kunnen hebben, maar waar we door onze activiteiten wel toe bijdragen.

De barrière die bestaat tussen de werelden van het microscopische en het macroscopische maakt dat het nodig is de logica te begrijpen van systemen op hun eigen niveau, niet op dat van de onderdelen ervan. Wat leven is, dient verklaard vanuit de dynamiek en de doelstellingen van de cellen, de organismen, en de populaties; niet enkel door het blootleggen van de onderliggende mechanismen. Al te dikwijls werd getracht een levend wezen te begrijpen door dissectie en chemische analyse. De theorie der dissipatieve structuren verschaft inzicht in het globale gedrag van processystemen en kan daardoor een fundamentelere bijdrage leveren tot het antwoord op de vraag wat leven is, dan biochemie of anatomie ooit in staat zijn te doen.

Laat ons de rol van de fluctuaties in een systeem nader bespreken. Dat zal toelaten een duidelijker inzicht te bekomen in de wijze waarop zij zich al dan niet manifesteren. We beschouwen daartoe een gas in een gesloten ruimte, bijvoorbeeld de lucht opgesloten in een fles.

In het gas bevinden alle moleculen zich in een staat van ongeordende beweging. De energie die besloten ligt in deze bewegingen is de warmte-inhoud van het gas. Aangezien er niets de deeltjes in vaste banen leidt, is de wanorde compleet. Door de onderlinge botsingen wisselen de moleculen voortdurend van snelheid en richting.

De wilde wanorde die heerst op het moleculair niveau contrasteert met de rust die het gas voor de waarnemer uitstraalt. Op het macroscopisch niveau is er niets dat beweegt, er is geen enkele oneffenheid; alles is gelijkmatig verdeeld en in rust. De uitwendige kalmte van het gas is enkel een gevolg van het grote aantal moleculen. Zou het gas bestaan uit niet meer dan bijvoorbeeld honderd moleculen, dan zouden er zich onvermijdelijk onregelmatigheden voordoen. Door de willekeur van de bewegingen kan het nooit zeker zijn dat zich op elk ogenblik precies de helft van de moleculen in elke helft van de beschikbare ruimte bevindt; vijftig moleculen in de linker helft, vijftig in de rechter. Het kunnen er op een bepaald ogenblik ook zestig en veertig zijn, of vijfenveertig en vijfenvijftig. Deze afwijkingen zijn in verhouding tot het totale aantal van honderd niet onbelangrijk en vallen dus op. Meer extreme verdelingen, zoals tien en negentig bijvoorbeeld, komen zeker ook voor, al zijn die eerder zeldzaam. In elk geval zou het systeem de indruk geven op wilde wijze heen en weer te springen.

Maar een gas waarover hier sprake is bestaat niet uit honderd of zelfs honderdduizend moleculen. Het zijn er onbeschrijfelijk veel meer. De lucht van de atmosfeer nabij het aardoppervlak kan als voorbeeld dienen; die bevat meer dan 2×10^{19} moleculen per kubieke centimeter; een typisch aantal voor thermodynamische systemen. Nog steeds treden in dergelijke veel-deeltjessystemen fluctuaties op. Ze zijn op zichzelf genomen zelfs aanzienlijk groter dan bij een systeem van een gering aantal deeltjes. Een plaatselijke afwijking van een paar miljoen is best mogelijk. Maar dit is nu volstrekt onbelangrijk geworden. Wat maakt een miljoen op een totaal aantal van 10^{19}? Het is er slechts een honderd miljardste deel van!

Langs statistische weg kan men aantonen dat de karakteristieke willekeurige fluctuaties in een systeem van N deeltjes van de orde van grootte zijn van de vierkantswortel van N. De verhouding van $\sqrt{N}$ tot N is gelijk aan $1/\sqrt{N}$. Dit betekent dat de fluctuaties in verhouding kleiner

worden naarmate N groter is. Voor zeer grote waarden van N worden de fluctuaties volkomen verwaarloosbaar. Dit is de zogenaamde wet van de grote getallen. Elk systeem van een groot aantal deeltjes lijkt zich met exacte nauwkeurigheid te gedragen. Onberekenbare fluctuaties spelen geen rol.

Op één of andere manier moeten de dissipatieve structuren deze wet van de grote getallen doorbreken. Fluctuaties spelen nu wèl een rol. Vanuit een onmerkbare plaatselijke en tijdelijke fluctuatie ontwikkelt zich geheel onverwacht een structuur die het hele systeem blijvend domineert. We vinden voorbeelden daarvan in tal van niet-evenwichtsystemen, vooral in een biologische context.

Spectaculair is het ontstaan van een termietennest, zoals beschreven door de onderzoekers P. Grassé en J.L. Denneubourg. De verschijning van een termietenheuvel komt spontaan tot stand temidden van het ongeordend gewriemel van een groot aantal termieten. Men weet dat deze insekten tijdens hun rondscharrelingen kleine brokjes aarde meesleuren, die ze doordrenken met een hormoon dat ze zelf produceren. Dit hormoon heeft de eigenschap door z'n geur de termieten aan te trekken. Onder invloed van de wanordelijke bewegingen zijn de insekten aanvankelijk ongeveer gelijkmatig over het terrein verdeeld. Maar fluctuaties doen zich onvermijdelijk voor. Indien zich tengevolge van zo'n fluctuatie op een bepaalde plaats plots iets meer van deze geurende aarde bevindt, worden nog meer termieten naar deze plek aangetrokken. Er ontstaat daar dan een ophoping van aarde, die nog meer diertjes lokt. Van dan af is het resultaat voorspelbaar; steeds meer termieten worden door de concentratie van hormoon aangetrokken en er vormt zich daar een termietenheuvel.

Het termietennest kan gezien worden als de versterking van een fluctuatie. Een gelijkaardig fenomeen lag, zoals we gezien hebben, aan de basis van het optreden van Bénard-cellen. Ook de concentratie-patronen in mengsels waarin chemische reacties optreden met een autokatalytische stap, kunnen toegeschreven worden aan de versterking van een toevallige en aanvankelijk uiterst kleine ophoping.

De oorzaak van het verschijnsel is telkens de instabiliteit van het systeem. Een verspreide verzameling termieten die hormoon ronddragen dat termieten aantrekt, is geen stabiel systeem. Het moet vroeg of laat leiden tot een 'catastrofale' ophoping. Dat is voorspelbaar. Wat vooraf onmogelijk voorspeld kan worden, is de exacte plaats en tijdstip van de ophoping. De instabiliteit leidt tot een bifurcatie, een splitsing van de mogelijkheden waarin het systeem terecht kan komen, en dan kan de invloed van één enkele oneindig kleine fluctuatie doorslaggevend zijn. Welke weg slaat een termiet in met rondom zich niets dan willekeurige fluctuaties die hem dan naar de ene, dan naar de andere kant loodsen?

Zodra een fluctuatie een zekere drempel heeft overschreden is de onzekerheid weggenomen, maar nabij het bifurcatiepunt is deze drempel oneindig laag.

De paradoxale toestand doet zich voor dat het perfect voorspelbaar gedrag van de processen binnen een systeem leidt tot een globaal onvoorspelbaar verloop. De kleinste afwijking kan tot een allesomvattende structuur uitgroeien. Noodzaak en toeval sluiten elkaar niet uit, maar liggen beide ten grondslag aan de totstandkoming van een dissipatieve structuur. Enkel door de samenwerking van de wetmatig verlopende processen en de onvoorspelbare spelingen van de onderliggende wanorde kan een dissipatieve structuur te voorschijn komen. De voorwaarde is dat het systeem onstabiel is, zodat de fluctuaties een kans krijgen.

Geen kristal, geen evenwichtsstructuur duldt een dergelijke vrijheid. Maar het niet-evenwicht geeft de anarchie haar kans.

De orde die we in een dissipatieve structuur aantreffen, is een fluctuatie die gigantische proporties heeft aangenomen en zich dan gestabiliseerd heeft. Het is een monster dat van binnenuit greep gekregen heeft op het systeem, en dit voorgoed van uitzicht doet veranderen. De wet van de grote getallen heeft geen vat meer op dit monster, want het vraagt niet om instemming van de meerderheid. Het voedt zichzelf en kiest z'n eigen weg.

Stabiliteit en heerschappij

Opdat een dissipatieve structuur zich zou ontwikkelen, volstaat het niet dat een fluctuatie versterkt uit de chaos te voorschijn treedt; zij moet ook zelf stabiliteit verwerven. Indien dit niet het geval is, blijft wanorde heersen want nieuwe versterkte fluctuaties zullen de structuur geen ogenblik de gelegenheid geven zich te handhaven. Maar er mag ook geen absolute stabiliteit optreden, want dan is geen enkele fluctuatie in staat zich meester te maken van het systeem.

De niet-lineaire processen die een fluctuatie kunnen versterken, werken destabiliserend, maar er zijn steeds ook stabiliserende factoren aan het werk. Diffusie bijvoorbeeld. Een plaatselijke ophoping van een hormoon in een termietenpopulatie, van een chemische stof in een reactiemengsel of van warmte in een verwarmde vloeistof, verspreidt zich steeds spontaan door diffusie. Als geen andere processen in het spel zijn, zorgt diffusie voor het dempen van elke plaatselijke opflakkering. Stabiliteit is dan gegarandeerd. Zolang deze stabiliserende werking overheerst, krijgt geen fluctuatie de overhand. Als stabiliteit niet meer verzekerd is, wordt alles mogelijk. Een dissipatieve structuur kan zich dan ontwikke-

len, op voorwaarde dat die zelf toch de nodige stabiliteit verwerft.

Deze gang van zaken herinnert aan de wijze waarop ook de biologische systemen evolueren. Mutaties zorgen voor voortdurende willekeurige veranderingen in het erfelijkheidsmateriaal van een biologische soort. Het zijn kleine onvoorspelbare wijzigingen in de overigens zeer stabiele structuur van het DNA. Meestal krijgen de mutaties geen kans zich door te drukken omdat ze de levensvatbaarheid van het individu rechtstreeks nadelig beïnvloeden of doordat ze nadien door natuurlijke selectie geëlimineerd worden. Dat zijn de stabiliserende factoren.

Maar een mutatie kan ook versterkt worden. Als de nieuwe eigenschappen van aard zijn de drager ervan betere overlevingskansen of meer nageslacht te bezorgen, zal zij zich handhaven en zich door erfelijke overdracht verder verspreiden. De soort is dan onomkeerbaar veranderd.

Een essentieel kenmerk van elke vorm van leven is de delicate balans tussen stabiliteit en vernieuwing. Totale stabiliteit leidt tot verstarring en kan trouwens enkel daar gevonden worden waar een systeem in evenwicht verkeert, en dus dood is. Het ontbreken van elke stabiliteit betekent echter chaos. Geen enkele structuur is dan mogelijk.

In het leven is de mogelijkheid gerealiseerd elke bestaande toestand te doorbreken doordat altijd de kans bestaat dat fluctuaties zich op systeem-schaal manifesteren. Alle moeite die elke soort zich getroost om zijn genetisch materiaal ongeschonden aan de individuen door te geven, belet niet dat er steeds met nieuwe genen en met nieuwe genetische combinaties geëxperimenteerd wordt. Naast stabiliteit wordt dus vernieuwing geduld. Alleen dat maakt evolutie mogelijk.

Maar niet elke verandering wordt aanvaard. Er wordt geselecteerd. Er zijn criteria waaraan de vernieuwingen worden getoetst, al kunnen ook die criteria veranderen.

Op welke wijze kunnen echter chemische systemen, die nog niet onderhevig zijn aan een darwiniaanse selectie, een ontwikkeling doormaken naar structuren die zich stabiliseren en toch blijven evolueren? De vraag is in wezen die naar de oorsprong van het leven.

Hoewel de reactie-diffusievergelijkingen van een Brusselator of een analoog chemisch stelsel wel in staat zijn het optreden van oscillaties en golven in de concentraties van produkten te verklaren, kan onmogelijk beweerd worden dat daarmee is aangegeven hoe biologische orde en complexiteit tot stand komen.

Het is algemeen aangenomen dat in het primitieve aardse milieu, en ook op andere planeten waar de omstandigheden daarvoor gunstig zijn, vele chemische bestanddelen die thans een belangrijke rol spelen in de levensprocessen, zich spontaan vormden. Talrijke experimenten in het laboratorium, waarin de omstandigheden van de oer-aarde werden nage-

bootst, hebben dit rechtstreeks bevestigd. Betrekkelijk eenvoudige organische moleculen zoals zuren, stikstofhoudende basen, suikers en aminozuren ontstaan door gewone chemische reacties in het niet-oxyderend gasmengsel waaruit de pre-biotische aardatmosfeer moet hebben bestaan.

De levende wezens zijn echter opgebouwd uit veel grotere moleculen, polymeren, gevormd door de aaneenrijging van talrijke kleinere eenheden, de monomeren. De polymeren waaruit elk organisme grotendeels is samengesteld zijn de eiwitten. De informatie van het levensverschijnsel zit vervat in de structuur van weer andere polymeren, de polynucleotideketens zoals DNA, die in staat zijn hun structuur aan elkaar door te geven en te laten omzetten in eiwitten, zoals besproken in hoofdstuk 8. De complexiteit van het leven zit besloten in de structuur van de polymeren waaruit het is opgebouwd. Hoe kwamen deze polymeren er?

Er zijn verschillende mogelijkheden. Door lineaire groei bijvoorbeeld, of door onderlinge samenwerking. Bij de lineaire groei ontstaat een polymeer doordat steeds meer monomeren aan de keten gekoppeld worden waardoor deze in lengte toeneemt. De monomeren bevinden zich aanvankelijk verspreid in de oplossing, maar zij hechten zich aan elkaar via chemische bindingen (oppervlaktekatalyse door vaste mineralen als klei kan hierbij een rol spelen). De snelheid van aangroei is evenredig met de concentratie van het monomeer: hoe meer monomeermoleculen in de oplossing aanwezig zijn, hoe meer er zich aan de keten koppelen.

Bij de andere methode voor polymerisatie maakt de keten gebruik van zichzelf om zich te vermeerderen. Als er al een keten is, dan kan een nieuwe keten tot stand komen doordat de eerste als 'afdruk' van de tweede fungeert. De monomeren hoeven zich nu niet één na één aan elkaar te koppelen maar leggen zich gelijktijdig tegen een reeds bestaande polymeermolecule. Ze doen dit in overeenkomst met de volgorde van monomeren die daarin reeds voorkomt, omdat dat de enige mogelijkheid is. Andere combinaties 'passen' niet. Zodra de monomeren de goede posities innemen, koppelen ze zich op hun beurt aan elkaar. Het nieuwe polymeer is nu een kopie van het reeds bestaande, omdat beide een strikt overeenkomstige volgorde van monomeren bezitten. De snelheid van deze werkwijze is evenredig met zowel de concentratie van de monomeermoleculen in oplossing als met die van de polymeermoleculen. De reactie is dus autokatalytisch: hoe meer polymeer reeds aanwezig is, hoe meer nieuw polymeer gevormd wordt, op voorwaarde ten minste dat voldoende monomeer beschikbaar is.

Welke van de twee methoden toegepast zal worden, hangt van de omstandigheden af. Op de primitieve aarde waren ongetwijfeld spontaan gevormde organische stoffen, die dienst zouden kunnen doen als mono-

meren, opgelost in de oceanen. Men spreekt in dit verband van de 'oersoep'. Deze soep was echter wel uiterst verdund. De hoeveelheid water op aarde is zo groot dat de concentratie aan organische moleculen onmogelijk hoog kan geweest zijn. Dit betekent dat de polymerisatie door zowel aaneenrijging als samenwerking uiterst traag moest verlopen. Indien zich een chemisch evenwicht heeft ingesteld, moet dit gekenmerkt geweest zijn door een zeer lage verhouding van de hoeveelheid polymeer tot monomeer. Het is niet in te zien hoe ooit leven kan zijn voortgekomen uit een zo ijl verdeelde en traag reagerende polymeer-oplossing.

Indien de toestand binnen het aards milieu zich echter ver uit evenwicht bevond, doordat er een snelle aanmaak was van monomeermoleculen, opent zich een nieuwe mogelijkheid. De polymerisatie door samenwerking verloopt omwille van zijn autokatalytisch karakter niet-lineair en kan onstabiel worden. Fluctuaties kunnen dan buitensporig groeien en zorgen voor plaatselijke hoge concentraties. Als het systeem open is en de aanvoer van monomeren verzekerd, kunnen op deze plaatsen de polymeren zich aan hoog tempo vormen. Hoewel de gemiddelde concentratie van organisch materiaal in de oer-oceaan steeds zeer laag moet zijn gebleven, is het niet de gemiddelde concentratie die een rol speelt maar wel de concentratie op de plaatsen waar de activiteit zich toespitst. En die kan veel hoger geweest zijn. We hebben nu niet langer een homogeen mengsel. Er vormde zich een ruimtelijke chemische orde. Inhomogeniteiten kwamen tot stand en versterkten zichzelf.

Het mechanisme van polymerisatie door samenwerking verwierf op die wijze een blijvende plaats in de levensprocessen. Lineaire groei werd onbelangrijk. Alle macromoleculen in de organismen worden thans geassembleerd door middel van een afdruk van de reeds bestaande macromoleculen. Deze chemische techniek domineert thans alle levensprocessen; het is een heerschappij gebaseerd op succes.

Evolutie

De aanmaak van macromoleculen door middel van polymerisatie op basis van afdrukken houdt nieuwe mogelijkheden in. Er kan een koppeling ontstaan tussen verschillende afdruk-mechanismen via derde moleculen die als katalysator voor de reacties optreden. Het is vooral Manfred Eigen geweest die de studie van dergelijke gekoppelde polymerisatie-systemen heeft ondernomen en de betekenis ervan heeft ingezien.

Eigen heeft modellen bestudeerd van wat hij noemt 'zichzelf reproducerende katalytische hypercycli'. Het zijn systemen van gekoppelde

afdruk-polymerisaties volgens het patroon dat we in de levensprocessen aantreffen. Een bepaald type polymeer treedt op als informatiedrager, het vervult de rol van het nucleïnezuur DNA in de levende cel. Dit polymeer geeft aan hoe andere polymeren moeten worden samengesteld, en het is tevens in staat zichzelf te reproduceren. De polymeren die gevormd worden door middel van de in het nucleïnezuur opgeslagen informatie zijn eiwitten. Het is de taak van deze eiwitten reacties te katalyseren, waaronder ook de zelfreproduktie van het DNA.

Een hypercyclus kan men zich nu als volgt voorstellen. Een polymeer I_1, een nucleïnezuur, reproduceert zichzelf en levert de informatie voor de produktie van een eiwit E_1. Dit E_1 katalyseert de zelfreproduktie van een ander nucleïnezuur I_2, dat op zijn beurt in staat is de aanmaak van een eiwit E_2 te verzorgen, nodig voor de zelfreproduktie van I_3. Enzovoort. Uiteindelijk stuiten we op een nucleïnezuur I_n dat een eiwit E_n maakt dat de zelfreproduktie katalyseert van I_1. De cyclus is daarmee gesloten.

Numerieke berekeningen tonen aan dat een zelfreproducerende katalytische hypercyclus snel groeit voor kleine waarden van n, en oscilleert voor grote n-waarden. Het interessante van een dergelijke hypercyclus heeft echter te maken met de rol die eventuele fouten spelen. Toevallige defecten in de moleculaire structuur van een der deelnemende moleculen kunnen steeds optreden. Een oorzaak moet niet steeds aanwijsbaar zijn; het kan een ioniserende straling zijn of de toevallige aanwezigheid van een vreemde en agressieve molecule. Indien de fout zich voordoet bij een informatiedragende molecule plant hij zich gemakkelijk voort doorheen het processysteem. De hypercyclus houdt echter vele mogelijkheden voor foutcorrectie in, waardoor de hele processtructuur een zekere stabiliteit verwerft. Terzelfdertijd is steeds de mogelijkheid aanwezig deze vergissingen te gebruiken voor het inslaan van nieuwe wegen. De weg staat dan open voor een evolutie van het systeem.

Indien in de loop van de cyclus een fout gemaakt wordt, ontstaat een zijtak. Er is een produkt gevormd dat niet past binnen de cyclus. Het nieuwe produkt kan zonder verder gevolg uit het processysteem gestoten worden. Het is dan niet meer dan een fluctuatie geweest die het systeem niet heeft verstoord. Maar het is ook mogelijk dat het aanleiding geeft tot de vorming van een nieuwe gewijzigde hypercyclus. De nieuwe en de oude hypercycli staan dan in competitie tegenover elkaar. Beide groeien en ontwikkelen zich en verbruiken de beschikbare grondstoffen van het milieu. Dit kan leiden tot een selectie van één van beide. Als gevolg van de niet-lineariteit van de processen zal de overwinnaar snel groeien en zijn dominerende positie innemen.

Het is een darwiniaans spel voor overleving geworden. Een voortbestaan wordt slechts gegund aan het processysteem dat zijn fouten binnen

redelijke perken houdt en vooral, dat leert gebruik maken van de fouten die toch optreden en die het onverwacht voordeel opleveren.

Creativiteit door vernieuwing

De hypercyclus lost een belofte in. Eenvoudige dissipatieve structuren manifesteerden reeds iets van de creatieve kracht die niet-lineaire systemen in niet-evenwichtsomstandigheden tentoon kunnen spreiden maar de mogelijkheden voor opbouw en ontwikkeling bleven nog beperkt. Het vermoeden bestond dat het principe van orde door fluctuatie aanleiding zou kunnen geven tot meer subtiele, meer 'biologische' vormen van organisatie. Nu de dissipatieve structuren gepaard worden aan chemische complexiteit, ontvouwt zich inderdaad een vermogen tot zelf-organisatie met verbluffende eigenschappen.

Het systeem beschikt over een overlevingskracht die alle verbeelding tart, vooral als we de spontane neigingen in acht nemen die elk deelnemend produkt moet vertonen voor afbraak, defecten en fatale verspreiding door diffusie. En ondanks die overlevingskracht is er geen sprake van een star voortbestaan; er doet zich integendeel een ontwikkeling voor, voortgedreven door eigen inventiviteit en selectie. Veranderingen treden op en trachten zich te doen gelden. Maar niet elke verandering is een verbetering. Op basis van eigen criteria, die in functie staan van de overlevingskansen, kiest het systeem uit de mogelijkheden die zich presenteren. Zo komen 'uitvindingen' tot stand; systematische verbeteringen van het processysteem die het aanpassingsvermogen en de efficiëntie ervan bevorderen.

Het principe zelf van de hypercyclus is gebaseerd op één der geniaalste uitvindingen gedaan door de natuur: samenwerking tussen systemen tot wederzijds voordeel. Moleculen van uiteenlopende soort en samenstelling verenigen zich in een processyteem om elkaars voortbestaan te helpen verzekeren. Er ontstaat een functionele organisatie, een orde gericht op de verwezenlijking van een doel. Dit is symbiose.

De hypercycli van Eigen geven aan hoe nucleïnezuren en eiwitten elkaar kunnen hebben gebruikt om gezamenlijk te evolueren. Een innige band ontstond daarbij tussen deze macromoleculen die aan de basis van de genetische code gelegen moet hebben. Het processysteem zelf moet een zekere mate van onafhankelijkheid verworven hebben van het milieu waarin het zich bevond. Het bleef voor zijn energievoorziening en bevoorrading aangewezen op de omgeving, maar de onafhankelijkheid ten opzichte van uitwendige veranderingen moet het een belangrijk voordeel gegeven hebben in de strijd om het voortbestaan. Het is eigen aan een

dissipatieve structuur dat deze een zekere autonomie ontwikkelt die steunt op de interne dynamiek van de processen, en niet op de karakteristieken van de omgeving, al moet die omgeving instaan voor de voortdurende doorstroming van energie en grondstoffen die de structuur in stand houden. In de samenhangende processystemen van hypercycli is deze capaciteit verder ontwikkeld. De basis is daarmee gelegd voor het ontstaan van organismen met eigen individualiteit. Een systeem ontwikkelt een persoonlijkheid, gekenmerkt door eigen structuren en eigen doelstellingen.

Geen enkel concreet detail van deze evolutie is voorspelbaar. Elke mogelijkheid voor vernieuwing die zich openbaart, ontstaat uit het niets, als een rimpeling op het water. Maar deze opborrelende inspiraties zijn slechts de bron van vernieuwing, niet de uitvoering zelf. Die komt tot stand onder invloed van de niet-lineaire processen en wordt in banen geleid door de selectiecriteria. Daardoor ontstaan uit wat anders futiele fluctuaties bleven, nu bestendige en respectabele verschijningen, als de duinen in het zand, gevormd door de dwarrelende en speelse wind. Deze selectiecriteria zijn de individualiteit zelf van het systeem en hebben als zodanig een ontwikkeling doorgemaakt die zelf onberekenbaar is.

Het mechanisme en het geheim van het hele proces is de capaciteit van het systeem om vernieuwing tot stand te brengen. Door zijn vermogen tot innovatie is het systeem in staat creatief te zijn, een creativiteit die voortkomt uit eigen ingeving en niet uit noodzaak. Vernieuwing behoedt het processysteem voor verstarring en verheft het van 'systeem' tot 'organisme'. Vernieuwing en niet wetmatigheid is de logica van eén organisme. Dank zij vernieuwing bestaat het, maar is het op geen enkel ogenblik gelijk aan zichzelf.

De onbestemde weg naar het leven is ingeslagen.

13

De onbepaaldheid van het organisme

Niets op deze planeet liet aanvankelijk voorzien wat zich hier zou afspelen. Het leven is in al zijn lagen — van cel tot biosfeer — onberekenbaar. Niet wetenschap, maar verwondering is de meest redelijke houding tegenover dit verschijnsel.

Het lijkt alsof we met de dissipatieve structuren, en meer bepaald met de complexe georganiseerde chemische structuren als hypercycli, de biologische dimensie in de natuur hebben gevonden. Maar is het verschijnsel van het leven daarmee wel echt begrepen? Is leven echt verwant aan deze vormen van chemische zelf-organisatie? Een regenworm is een levend wezen, een boom, een kip, een amoebe; maar een hypercyclus? We voelen weerstand tegen het denkbeeld deze abstracte chemische processtructuren met biologische organismen te vereenzelvigen. Heeft een hypercyclus een eigen identiteit, een lichaam, onderscheidbaar van de omgeving als een vogel in de lucht? Heeft hij een persoonlijkheid?

Toch is een hypercyclus 'leven'. Niet de chemische componenten, de nucleïnezuren en eiwitten, verheffen hem tot leven, maar wel zijn gedrag. Hij bezit een metabolisme, vermenigvuldigt zich, en evolueert onder invloed van mutaties. Datgene wat leven onderscheidt van niet-leven vinden we hier terug in eenvoudige maar onmiskenbare vorm. Het tegelijk stabiele en steeds evoluerende, tegelijk wetmatige en eeuwig onbestemde is wat we herkennen als het typische van het leven. Primitief maar onmiskenbaar bezit een hypercyclus deze kenmerken.

Maar dat maakt hem nog niet tot een levend wezen, als een plant of een dier of een bacterie. Daartoe is meer nodig. Alle levensvormen op aarde zijn opgebouwd uit cellen, compartimenten gescheiden van de omgeving door een membraan en met een complexe interne structuur. Deze cellen leiden een autonoom leven, ook binnen een meercellig organisme, en vermenigvuldigen zich door een ingewikkeld delingsproces, zoals eerder besproken. Ze hebben een eigen vorm en karakter. Het zijn 'wezens'.

De hogere organisatie, die de hypercyclus optilt van loutere processtructuur tot biologische cel, moet nog worden opgebouwd.

De spontane zelf-organisatie van een chemisch reactiemengsel die uit blinde reacties een samenhangend processysteem doet verrijzen, geeft een glimp van een aanwijzing hoe uit het levenloze substraat van een planeetbodem datgene te voorschijn kan komen wat we thans leven noemen. Maar het levert nog niet direct een overtuigend voorbeeld op van de vormen van leven die thans de meest sprekende manifestatie ervan zijn: een cel, een organisme of een populatie daarvan.

Hoe kan het dan verder verlopen zijn? Het is, ongelukkig genoeg, nauwelijks mogelijk zich langs theoretische weg een voorstelling te maken van wat zich in werkelijkheid heeft afgespeeld. De sporen van de prille levensactiviteiten zijn reeds lang uitgewist, en fundamentele onzekerheden eigen aan deze evolutie sluiten elke louter theoretische afleiding ervan uit. Evenmin als de geschiedenis van het Romeinse Rijk kan worden afgeleid uit de chemische eigenschappen van de Italiaanse bodem, kan het ontstaan van de prokaryoten of elke andere primitieve vorm van leven worden afgeleid uit natuurkundige basisprincipes. De geboorte en jeugd van het leven op deze planeet kan in principe wel begrepen worden, maar nooit exact gekend.

De historische rol van de hypercycli zelf is reeds onduidelijk. Het is zelfs niet zeker dat zich in werkelijkheid eerst hypercycli hebben gevormd, waaruit zich door verdere ontwikkelingen levende wezens zouden hebben gevormd, zoals hier wel gesuggereerd werd. We weten het niet. Wat ik slechts wil benadrukken, is dat in de geordende chemische systemen van hypercycli reeds iets van de aard zelf van wat leven is, teruggevonden wordt. Het is daardoor tenminste denkbaar en begrijpbaar dat leven zich vormt door zelf-organisatie van niet-lineaire chemische reacties. Het is mogelijk dat het hypercycli waren van het hier besproken type die de verschijning van de eigenlijke levende wezens zijn voorafgegaan en er hun kenmerken aan doorgaven, maar andere scenario's zijn denkbaar. De hier besproken details mogen zeker niet als een schets van de werkelijk doorgemaakte evolutie opgevat worden.

Nochtans lijkt een hypercyclus-structuur als zodanig wel noodzakelijk voor het op elkaar afstemmen van zichzelf voorplantende chemische subsystemen in een samenhangend systeem van grotere complexiteit. De uivinding van deze structuur, hoe en wanneer ook, moet een mijlpaal geweest zijn in de ontwikkeling van het leven op aarde. Het kan echter niet voldoende geweest zijn voor een echte doorbraak van de biologische activiteit. Nieuwe, nog geraffineerder en subtielere eigenschappen dienden daartoe ontwikkeld.

Zo bezitten de planten en dieren die de aarde thans bevolken de mogelijkheid niet enkel een fenotypische, maar ook een genotypische evolutie te ondergaan. Hypercycli missen deze laatste capaciteit.

De evolutie van hypercycli gebeurt, zoals gezegd, door de ononderbroken competitie tussen varianten in de chemische structuren die optreden als gevolg van fouten die gemaakt worden tijdens de talrijke kopie-en synthese-processen. Een hypercyclus is in staat die bepaalde variant te kiezen en selectief te versterken die hem direct voordeel oplevert. Op die wijze kunnen wijzigingen in de chemische mechanismen aanleiding geven tot nieuwe functies die zich als een verworven goed in stand houden. Dat is een fenotypische evolutie. Zij bepaalt rechtstreeks de waarneembare kenmerken van het systeem. De hypercyclus optimaliseert zijn kenmerken door deze evolutie.

Wat hij echter niet in staat is te doen, is een verandering te selecteren die pas in een later stadium een voordeel kan opleveren. We zouden, in biologische termen, een dergelijke verandering een mutatie kunnen noemen in het erfgoed van het systeem, een genotypische verandering, waarvan het effect niet direct terug te vinden is in de systeemkenmerken maar die nadien misschien voordelige ontwikkelingen mogelijk maakt.

Manfred Eigen zelf heeft erop gewezen dat hypercycli in dit opzicht tekort schieten. Hij meent echter dat de evolutie van hypercycli moet leiden tot de vorming van gelokaliseerde compartimenten waardoor de wisselwerking tussen fenotypische en genotypische eigenschappen, die wordt vastgesteld bij de hoger ontwikkelde systemen, uiteindelijk gerealiseerd kan worden. Indien de substanties van een hypercylcus niet langer homogeen verdeeld voorkomen maar zich organiseren in compartimenten met gespecialiseerde functies, zijn nieuwe ontwikkelingen mogelijk. Als een nieuw kenmerk opduikt kan het zich dan in bepaalde omstandigheden handhaven en kan het versterkt worden tengevolge van omgevingseffecten, ook al heeft het niet direct invloed op de gedragingen van het systeem in zijn geheel.

Een compartimentalisatie verleent de zichzelf voortplantende onderdelen van een hypercyclus meer individualiteit. De compartimenten zijn ruimtelijk duidelijk afgebakend, ontwikkelen een eigen kadans en doorlopen een eigen geschiedenis. We zouden het ontstaan ervan kunnen opvatten als de geboorte van de biologische cel, de kleinste eenheid van levende materie op dit ogenblik.

Hoe kan de prebiotische en vroeg-biologische evolutie op aarde in zijn werk zijn gegaan?

In de zuurstofloze oeratmosfeer van de aarde waren de moleculen aanwezig die noodzakelijk zijn voor de opbouw van een hele reeks organische produkten. De ultraviolette straling van de zon en bliksems in de atmosfeer leverden daartoe de nodige energie. Experimenten in het laboratorium bevestigen dat interessante reacties inderdaad mogelijk zijn in dergelijke omstandigheden, zoals voor het eerst in 1953 door Harold Urey en Stanley Miller aangetoond. Indien men de samenstelling van de primitieve aardatmosfeer nabootst (een mengsel van koolstofdioxyde, koolstofmonoxyde, waterdamp, stikstof, methaan, waterstofsulfide) en energie toevoegt onder de vorm van ultraviolette straling of elektrische ontladingen, wordt vastgesteld dat zich verrassend complexe moleculen vormen zoals carbonzuren, aminozuren, pyrimidinen en purinen (de laatste twee zijn stikstofhoudende basen).

Met deze syntheses werden de bouwstenen bekomen voor de macromoleculen. In het niet-evenwichtsmilieu ontwikkelden zich lokale concentratiegradiënten waardoor de in hoofdstuk 12 besproken polymerisaties optraden. De eiwitten, gevormd door polymerisatie van aminozuren, waren vermoedelijk de eerste biologisch betekenisvolle manifestaties van zelf-organisatie die uit de macromoleculaire soep te voorschijn kwamen. Ze misten echter nog het vermogen tot zelf-voortplanting. Nucleïnezuren, die historisch waarschijnlijk pas later een rol gingen spelen, bezaten dit vermogen wel. Geholpen door de eiwitten, slaagden de nucleïnezuren erin kopies te maken van zichzelf door middel van een afdrukpolymerisatiemechanisme. Daardoor werd de deur opengezet voor nietlineaire groeiprocessen, wat op zijn beurt tot selectieve versterking leidde.

Met de daardoor ontstane mogelijkheid macromoleculen op betrouwbare wijze en op grote schaal te synthetiseren, was een eerste fase van chemische zelf-organisatie voltooid. De informatie opgeslagen in de moleculaire ketens werd op actieve wijze in stand gehouden. De verdere ontwikkeling van de zichzelf voortplantende moleculen kon nu gebeuren onder invloed van een darwiniaanse evolutie, door het selectief versterken van toevallige afwijkingen. Orde door fluctuatie vestigde zich voor goed op aarde.

Deze darwiniaanse fase moet opgevolgd zijn door een integratie-fase, waarin de nucleïnezuren de mogelijkheden ontdekten van onderlinge samenwerking voor verdere groei. Zo ontstonden superstructuren die op

hun beurt in competitie traden en selectie ondergingen. Langs theoretische weg kan worden aangetoond dat een hypercyclus beantwoordt aan de eisen voor een succesvolle superstructuur, ook al is het niet bekend op welke wijze de hypercyclus precies tot stand kan zijn gekomen. Eenmaal gevormd biedt hij echter alles wat succes verzekert in de strijd voor groei en zelf-consolidatie.

Een belangrijke consequentie van het ontstaan van een hypercyclus is dat definitieve keuzen worden gemaakt. Het 'vertaal-systeem' voor de informatie opgeslagen in de nucleïnezuren wordt voorgoed vastgelegd. Verbeteringen in het systeem worden nog wel geduld maar radicale alternatieven zijn uitgesloten want die zijn niet langer verzoenbaar met de superstructuur die zich heeft opgebouwd. Op die wijze moet de universele genetische code zich hebben ingesteld. Alle levensvormen op aarde gebruiken thans zonder uitzondering dezelfde taal om de informatie voor de opbouw van hun eiwitten in nucleïnezuren op te slaan. Dit is niet omdat dit de enig realiseerbare mogelijkheid zou zijn of omdat het van bij de aanvang het enige systeem was, maar wel omdat een selectiemechanisme werkte dat actief bleef tot één systeem de absolute overhand kreeg.

Analoge selectiemechanismen werken thans in de culturele evolutie van de mens. Het Romeinse alfabet is in de Westerse wereld een (bijna) algemene verworvenheid. Het tiendelig talstelsel is nog algemener verspreid, zoals ook het voorschrift dat in het verkeer rechts moet worden gereden. Geen van deze codes of gedragsregels zijn een absolute noodzaak, zoals de uitzonderingen trouwens bewijzen. Een vrijwel eindeloos aantal varianten is denkbaar en in vele gevallen gerealiseerd. De menselijke geschiedenis is te kort om de volledige overheersing van één der varianten reeds te hebben laten plaatsvinden. Het proces is echter, zoals we vaststellen, in volle gang. Elke volledige eenmaking van een regel of gewoonte maakt ons armer door het definitief verlies van alternatieven met hun eigen specifieke mogelijkheden. Het is een prijs die we voortdurend betalen voor onze ontwikkeling; het afsluiten van wegen, afwijzen van kansen, opgeven van wat ooit dierbaar was.

Meestal wordt de overwinnaar niet aangewezen op basis van superieure kwaliteiten. Hij duikt als een verrassing op uit het bos aan mogelijkheden. Waarom werd het Engels een wereldtaal en niet het Sanskriet of het Nederlands? Op basis van welke verdienste kregen de Arabische cijfertekens de overhand over de hele wereld? Zeker niet omwille van een onovertrefbare leesbaarheid.

Elke evolutie is het samengaan van uit het niets te voorschijn komende varianten en de onverbiddelijke maar evenmin voorspelbare uitroeiende werking van de selectiemechanismen. We kunnen slechts dromen over de mogelijkheden die zich op aarde hebben gepresenteerd voor

de ontwikkeling van vormen van leven, mogelijkheden die nooit een kans kregen voor ontplooiing, niet omdat ze minderwaardig waren, maar omdat ze pech hadden.

Als we de onbeschrijfelijke verscheidenheid aan vormen en gedragingen gadeslaan die zich op aarde hebben ontwikkeld na de ontelbare keuzen voor beperking die gemaakt geweest zijn, dan dringt de kracht van het biologisch verschijnsel ten volle door. De aardse biosfeer kan evenmin een representatieve uiting van het verschijnsel leven zijn als Agatha Christie's *Tien Kleine Negertjes* een typisch beeld geeft van de wereldliteratuur. Het is een voorbeeld, niet meer. Het leven op aarde is als combinatie van natuurelementen zonder twijfel geniaal, zoals Agatha Christie's thriller, maar de waardering ervoor is een kwestie van smaak.

Het leven begrepen?

Ik wil de gedachtengang over de mogelijke ontwikkeling die het leven op aarde heeft doorgemaakt hier afbreken. Het probleem is niet uitgediept, het is zelfs nauwelijks aangesneden. Waar we met onze theoretische beschouwingen over de prebiotische evolutie reeds fataal terechtkwamen in een moeras van onbeslisbare mogelijkheden, dient elke hoop opgegeven iets zinnig te kunnen zeggen over de wijze waarop de eigenlijke biologische structuren zich onder invloed van de natuurkrachten ontwikkeld moeten hebben. Alles wat dan nog gedaan kan worden, is nagaan wat de werkelijke gang van zaken was aan de hand van paleontologische gegevens. Boeiend als een dergelijke studie is, draagt zij toch in weinig opzichten werkelijk bij tot een werkelijk begrip van het levensverschijnsel. De geschiedenis van het leven op aarde is een spannend verhaal, als de *Tien Kleine Negertjes,* maar leert ons weinig over *Hamlet,* nochtans geschreven met dezelfde zesentwintig letters. Er is geen veralgemening mogelijk. Het biedt geen overzicht, laat staan dat het tot een begrijpen zou leiden.

We zullen daarom in dit boek het verhaal van het leven op aarde niet verder vertellen. Wat ons bezig hield, was de vraag naar de aard van het leven op deze planeet. Het leven bleek zo'n zonderling en uniek verschijnsel dat het ons vanuit wetenschappelijk oogpunt voor heel aparte vragen plaatst. De klassieke scheikunde, mechanica en thermodynamica konden geen bevredigende uitleg geven en leken slechts twee mogelijkheden te laten: de ogen sluiten voor het fenomeen of erkennen dat de aarde een uitzonderlijk en onverklaarbaar verschijnsel is in de kosmos. De moderne thermodynamica van niet-evenwichtssystemen heeft enigszins onverwacht toch een weg gevonden binnen de wetenschap die rekenschap geeft van de specifieke eigenheden van het leven. Niet slechts

bijkomstigheden als morfologie of chemische samenstelling kwamen binnen het bereik van de wetenschappelijke inzichten, maar ook de wezenlijke kenmerken ervan zoals zelf-organisatie, creativiteit en onbepaaldheid. Misschien lijkt het nu zelfs alsof we de verklaring in handen hebben en het wonder uitgewist. Is dat werkelijk het geval?

Het permanente niet-evenwicht van het leven houdt de sleutel in van de nieuwe inzichten. Op alle niveaus, van de organische moleculen tot de biosfeer, bevindt het leven zich ver uit evenwicht en het is allereerst dat feit dat onder ogen gezien moet worden. De Britse astronoom Fred Hoyle heeft uitgerekend dat de kans dat men door een willekeurig schudden van aminozuren eeñ werkzame groep van enzymen kan produceren kleiner is dan 1 op 10^{40000}. Als men zich realiseert dat de leeftijd van het heelal minder dan 10^{18} seconden bedraagt (10 tot 20 miljard jaar) blijkt overduidelijk dat het uitgesloten is dat de gewenste combinatie in de beschikbare tijd op aarde door toeval tot stand kwam. Hoyle stelt dan voor dat het leven niet op aarde maar in de interstellaire ruimte is ontstaan, wat een veel groter aantal combinatiemogelijkheden moet opleveren. Maar ook al hebben de chemische reacties van alle galaxieën in heel de ruimte van het universum gedurende tientallen miljarden jaren bijgedragen tot de synthese van de moleculen die hier op aarde het leven vormen, dan nog is dat hopeloos onvoldoende. Hoyle komt daarom tot het besluit dat er een super-intellect moet bestaan, dat de benodigde moleculen op doelgerichte wijze heeft samengesteld.

Hoyle heeft gelijk dat de biologische moleculen niet door een blind toeval kunnen zijn gerealiseerd. Maar hij ziet een essentieel gegeven eenvoudig over het hoofd: de niet-evenwichtstoestand van het chemisch milieu, waarin de synthesen tot stand kwamen. In het licht van dat niet-evenwicht heeft zijn waarschijnlijkheidsberekening geen enkele zin. Als men de kans berekent dat een Bénard-cel door blind toeval tot stand komt, vindt men een overeenkomstig absurd getal.

Waar de natuur niet in evenwicht verkeert, gaat zij echter niet langer blind te werk. Het begrip waarschijnlijkheid verliest elke betekenis. Spontane zelf-organisatie komt in de plaats. De zelf-organisatie werkt dank zij de instabiliteiten die optreden in de niet-evenwichtstoestand en de selecties die werkzaam zijn waar het systeem in interactie komt met concurrerende systemen. De entropie van het systeem daalt, en de meest onwaarschijnlijke constructies komen tot stand.

De thermodynamica van niet-evenwichtsystemen heeft het concept opgeleverd van de dissipatieve structuren en heeft daarmee het theoretisch raamwerk geleverd voor een begrijpen van het levensverschijnsel. De aardse biosfeer — Gaia — is een globale chemische dissipatieve structuur die zichzelf, zoals elke dissipatieve structuur, op actieve wijze in

stand houdt maar ondertussen toch niet ophoudt te veranderen. De biosfeer is bovendien een hiërarchische structuur. Elk organisme, elke cel, elk cellulair processysteem is een dissipatieve structuur die zich handhaaft en toch verandert... De details van de evolutie en van het functioneren zelf van de organismen zijn niet volledig opgehelderd, maar dat blijven slechts details. De essentie lijkt begrepen.

Er is een brug gelegd tussen biologie en thermodynamica, tussen darwiniaanse evolutie en de tweede wet. Entropie is wanorde, maar entropieproduktie werd de bron van orde. Het is mogelijk geworden de specifiek biologische aspecten van deze planeet anders op te vatten dan als ongerijmdheden. Voor spontane vernieuwingen en creativiteit werd een plaats gevonden in het wetenschappelijk gedachtengoed, dat definitief zijn deterministisch en mechanistisch harnas heeft afgeworpen. De blik van de wetenschap is ruimer geworden sinds de dagen van Laplace.

Maar dit alles heeft een prijs gevraagd. De prijs voor de wetenschap is, helaas, groter dan de opbrengst. De wetenschap heeft haar vermogen te voorspellen verloren en daarmee, in zekere zin, haar reden van bestaan.

Onzekerheid

In de kennis die is voortgekomen uit ons onderzoek, is een element geslopen dat aanvankelijk van minieme betekenis leek, maar uiteindelijk tot monsterachtige afmetingen is uitgegroeid. Het is het principe van de onzekerheid. Bedoeld is niet de quantummechanische onzekerheid die reeds in het begin van deze eeuw de fysica is binnengedrongen en die de atomaire wereld van het determinisme bevrijdde. De niet-evenwichtsthermodynamica heeft het concept van principiële onzekerheid echter ook de macroscopische wereld binnengeloodst.

Van geen enkele dissipatieve structuur is het gedrag vooraf in detail precies bepaald. Waar deze onbepaaldheid voor een convectie-cel slechts slaat op haar draaizin, en voor een Belousov-Zhabotinsky-reactie op de vorm van de chemische golven, slaat zij voor een biologisch organisme op het geheel van al zijn eigenschappen en gedragingen. Er is, met andere woorden, zo goed als niets meer vooraf bepaald. Alles is mogelijk geworden. Niets is nog zeker. In zoverre wetenschappelijk begrip gemeten wordt aan de hand van het vermogen tot voorspellen, levert het inzicht in de aard van het leven dus niets op. Op geen enkele wijze laat het toe vooraf te zeggen hoe het leven zich verder zal gedragen, evenmin als het toelaat uit de huidige toestand van het leven op aarde de voorgeschiedenis ervan af te leiden. Al evenmin kunnen we een zinvolle uitspraak doen

over mogelijke biologische ontwikkelingen op andere planeten, op basis van bekende omstandigheden daar.

De pogingen van radio-astronomen om signalen uit de ruimte op te vangen van andere beschavingen zijn daarom naïef. Ondanks de beweringen dat afstand genomen wordt van geocentrische of antropocentrische uitgangspunten, zoekt men naar frequenties en modulaties die zouden wijzen op een 'artificieel' karakter, in tegenstelling tot de 'natuurlijke' signalen. Het is een strategie die in werkelijkheid volledig doordrongen is van onze eigen specifieke situatie. Radiocommunicatie, symbolisch gecodeerde boodschappen en intelligentie zijn aardse uitvindingen. Elk onvermogen zich voor te stellen hoe het leven zich anders zou hebben kunnen ontwikkelen, rechtvaardigt niet dat aangenomen wordt dat buitenaards leven zich op gelijkaardige wijze zou manifesteren. Radiocommunicatie is niet een noodzakelijke ontwikkeling, zoals doorgaans nog wel aannemelijk wordt gevonden, maar ook intelligentie behoort er niet noodzakelijk bij. De hogere planten bewijzen dat het leven een evolutieweg kan kiezen waarin intelligentie een onbekend begrip is.

De kans dat de huidige pogingen contact te leggen met buitenaardse levensvormen uitlopen op succes, lijkt me kleiner dan de kans dat in onuitgegeven composities van Johann Sebastian Bach nog een *Honky tonk train blues* wordt ontdekt. De mogelijkheid dat dit gebeurt, is eigenlijk niet in kans uit te drukken; het is een absurditeit.

Het feit dat dank zij het principe van 'orde door fluctuatie' thermodynamische systemen een niet-deterministisch gedrag vertonen, vooral naarmate zij meer complex zijn, moet het vanuit natuurkundig oogpunt aanvaardbaar maken dat biologische systemen inderdaad een onvoorspelbaar gedrag bezitten en zich als 'vrije' wezens manifesteren, bestuurd door interne eigen keuzen. Deze opvatting is echter onder biologen nog niet algemeen aanvaard.

Een veelgehoorde stelling is dat een organisme, afgezien van de niet-erfelijke kenmerken die voortkomen door invloeden van het milieu, volledig door zijn genetisch materiaal gedetermineerd zou zijn. De idee is dat als men de structuur van het DNA van een organisme volledig zou kennen en de beschikking had over een voldoende grote computer, het in principe mogelijk is het hele organisme in detail te berekenen. Het organisme zou even ondubbelzinnig voortspruiten uit de informatie opgeslagen in zijn genen als de muziek die wordt geproduceerd door de groeven in een grammofoonplaat.

Die opvatting is echter te weerleggen. Een organisme berekent zichzelf niet maar is het resultaat van een groeiproces dat start bij de bevruchting van de eicel en eindigt bij de dood. Het is een proces waarin de eigen genen een leidende rol spelen maar waaraan ook de omgeving en toevalli-

ge factoren actief deelnemen. Externe omstandigheden bepalen mee het effect van de genen en ook spelen toevallige chemische of thermische fluctuaties binnen het lichaam een rol bij de ontwikkeling ervan. Er is daarom in het algemeen niet één fenotype dat hoort bij een bepaald genotype.

Daarbij komt dat het organisme de omgeving niet passief ondergaat, als was die omgeving een onafhankelijk decor waarin het terecht gekomen is, maar het bouwt zelf op actieve wijze deze omgeving mee op. Alle organismen zijn niet enkel verbruikers, maar ook producenten van organische materiaal nodig voor het voortbestaan van het leven. De wortels van planten veranderen de structuur en samenstelling van de bodem waarin zij groeien. Grazende dieren bemesten de grond waarvan zijn zich voeden. De ganse aardatmosfeer werd door de planten zodanig verrijkt met zuurstof dat zij nu voor de dieren een vitale bron van energie vormt.

Het organisme en zijn milieu vormen een dubbel-systeem, dat op samenhangende wijze evolueert. De natuurlijke selectie van de darwiniaanse evolutie kan daarom niet een simpel elimineren van organismen zijn die niet aan vooraf door de buitenwereld gestelde normen zouden beantwoorden. Die buitenwereld is zelf mee gevormd en maakt ook zelf mee deel uit van het organisme. Er stellen zich in de loop van de evolutie eigen selectieregels die zelf te voorschijn komen uit de eigen interne dynamiek van het evoluerend dubbel-systeem.

We hebben besproken hoe het leven op globale schaal het aardse milieu tegelijk omvormt en in stand houdt op een wijze die onnatuurlijk lijkt voor een planeet. Het leven gaat daarbij klaarblijkelijk volgen's eigen inzichten te werk en niet of nauwelijks volgens externe noodwendigheden. Het leven op aarde kan daarom niet voorgeprogrammeerd zijn. Het kan niet voorgeschreven worden door de fysische geaardheid van deze planeet, want die geaardheid is zelf voor een groot deel het produkt van het leven.

Wat de ultieme oorzaak is van elke gebeurtenis die deze co-evolutie van het aardse milieu en zijn bewoners voortstuwt, blijft ontsnappen aan elke identificatie. Maar de reden daarvan is nu bekend. Althans ten dele. Zij ligt in de onbegrensde mogelijkheden aan fluctuaties en selecties die een dergelijk hypercomplex processysteem toelaat. Vanuit deze niet geplande, niet voorziene opwellingen zijn de grote uitvindingen van het leven voortgekomen: de genetische code, de fotosynthese, de ademhaling, de geslachtelijke voortplanting, de meercelligheid, het centrale zenuwstelsel, de verovering van het land, het zien, het horen, het vliegen, de taal, intelligentie, kunst, computers, kerncentrales.

Niets van dat alles was een noodzakelijkheid. Niets van dat alles zou zich, in de extreme onwaarschijnlijkheid die er inherent aan is, op vergelijk-

bare wijze herhalen indien de geschiedenis herdaan kon worden. Alles zou anders zijn. De variatiemogelijkheden zijn onuitputtelijk en bij elke splitsing leidt de weg naar een nieuw continent van mogelijkheden. Op een andere planeet moet het leven voor aardse ogen onherkenbaar zijn.

Niets van wat op aarde wordt aangetroffen, kan verwacht worden elders in het heelal nog voor te komen. Ook niet op plaatsen met vergelijkbare omstandigheden als op aarde. De omstandigheden spelen nauwelijks een rol.

De grote stilte wordt begrijpelijk.

14

Het grenzeloze van de aarde

In de loop van haar ontwikkeling werd de aarde een levend lichaam met eigen karakter en wil. De verdere mogelijkheden van deze ambitieuze planeet zijn onbegrensd.

Tienduizend meter boven de grond, op de grens van de stratosfeer, waar reizigers bedaard op de aarde neerkijken, lijkt alle beweging stilgevallen. Hier begint het buitenaardse. Hier is alles ijl en licht. Afstanden zijn nog slechts theoretische begrippen. Door het raampje is het groene land in wazige pastelkleuren te zien. Afgelijnde stukken land in verschillende tinten. Enkele autowegen als scherpe lijnen. Het glimmende water van een kanaal. Niets beweegt.

Ik tracht me te realiseren dat in die paar kilometer tussen mij en de grond alles gebeurt wat het zonnestelsel beroert. Dit slapende decor onder een laag troebele lucht is de levende aarde. De steden zijn grijs, vlak en uitgestrekt.

Nieuwe levensstijlen

Wat is een stad? Bijna nooit werd de aanleg ervan gepland, maar toch kan een stad niet spontaan ontstaan uit het zand van de bodem waarop zij rust. Een stad is de meest recente realisatie van het leven op deze planeet. Na het plankton in de oceanen, de koraalriffen, de grote steppen, de wouden, bouwt het leven hier wereldwijd nieuwe structuren op met nooit eerder geziene vormen, nooit eerder gebruikte materialen. En met nooit uitgesproken bedoelingen.

Elke stad is een gigantische fluctuatie, een concentratie van menselijke activiteit die groeit en zich organiseert en zich dan vastnestelt op de plaats waar ze te voorschijn kwam. De kiem ervan is vrijwel nooit terug te vinden. Het einde ervan is niet te voorzien. Maar noch het begin, noch

het einde is van belang. Een stad leeft, en alleen het aan de gang zijn van het leven is wat telt.

Steden zijn geraffineerde structuren. Zij hebben zelf niet de middelen om zich in stand te houden, niet het voedsel en niet de energie, maar ze slagen erin te overleven. Duizenden jaren soms. Wie de wispelturigheid van de bewoners kent en de fragiliteit van de bouwwerken, kan niet geloven dat steden de eeuwen trotseren, aardbevingen doorstaan, verwoestende branden te boven komen en uit de as van kernexplosies herop-rijzen. De vitaliteit ervan lijkt grenzeloos.

Steden danken hun levenskracht aan de processen die ze zelf mogelijk maken: de geordende en georganiseerde menselijke activiteiten. Het zijn nesten van economie en cultuur. De bezigheden van honderdduizenden mensen bij elkaar vormen een processysteem dat op zovele manieren gekoppeld en vervlochten is dat de dynamica ervan onmogelijk te beschrijven is. De complexiteit tart elke verbeelding. Alle voorwaarden voor niet-lineaire effecten zijn echter aanwezig: er is groei, soms explosieve groei mogelijk van elk element dat geliefd of nuttig is. De mensen moedigen aan, bootsen na en vermenigvuldigen waar ze van houden of wat ze nuttig oordelen. Snelle groei is daardoor mogelijk. Maar ook stabiliteit is tot op zekere hoogte verzekerd: ongewenste aspecten worden geweerd of aan banden gelegd. De selectie gebeurt meestal niet volgens absolute criteria maar aan de hand van normen die zelf deel uitmaken van de heersende opvattingen. Absoluut goed of kwaad, waar of onwaar, spelen zelden een rol. De krachten die het proces regeren zijn hoop, en voorkeur, en onverklaarbare liefde.

De compacte samenleving van een stad is een milieu dat bij uitstek geschikt is voor het ontstaan van nieuwe levensstijlen, modes, filosofieën en uitvindingen. Er broeit altijd wel wat en er is feedback. Wat succes heeft, groeit, geleidelijk of explosief. Wat geen steun vindt, kwijnt weg.

Niet steeds is het karakter van een nieuwigheid duidelijk. Wat aanvankelijk als een gevaarlijke of ongewenste trend wordt opgevat, kan zich nadien ontpoppen als een verfrissende aanpak die het leven nieuwe impulsen geeft. In het ondefinieerbare gebied van maatschappelijke waarden speelt zich de strijd voor overleving af van ideeën en cultuur. Hier pioniert de stad. Hier zet zich de evolutie voort van het leven op deze planeet.

Elke stad en elk dorp is een open systeem dat mensen en materialen, energie en ideeën invoert en uitvoert. Nooit kan een stad zich van haar omgeving isoleren. Een ononderbroken wisselwerking met de rest van het land is noodzakelijk. De in- en uitwaartse stromingen komen tot stand door het ontbreken van evenwicht tussen de compacte, intensieve stad en het ijle land er omheen. Er is ook geen evenwicht binnen de stad zelf. Er

zijn altijd behoeften, er is altijd bedrijvigheid. Er moet ononderbroken worden gewerkt om op te bouwen, overeind te houden of aan te passen. De orde en organisatie van de dissipatieve structuur die een stad is, komen voort uit de processen die lopen onder invloed van dit niet-evenwicht. De activiteiten van de stad produceren warmte en afval die in de omgeving worden afgevoerd.

Het is de zelf-organisatie onder invloed van entropie-producerende processen, die het leven op aarde op alle niveaus kenmerkt. Van de hypercyclus voor eiwitproduktie, tot de metropolen van de twintigste eeuw, organiseert het leven zich in complexe semi-stabiele evoluerende structuren, altijd op zoek naar vernieuwing maar ook altijd vechtend voor zelfbehoud. Het is het eeuwig koorddansen tussen de zekerheid van stabiliteit — chemische of biologische of sociale stabiliteit — en de creatieve mogelijkheden van de omwenteling die breekt met alle zekerheid. De weg die gevolgd wordt, is wat achteraf 'geschiedenis' wordt genoemd.

Het resultaat van deze geschiedenis zijn de meest onwaarschijnlijke en onvoorspelbare structuren die de kosmos kent.

Op alle niveaus profiteert het leven van de aarzelingen van de natuur om zelf orde te scheppen. Op atomair niveau heerst de thermische wanorde van de bewegingen der deeltjes. In zoverre rigide moleculen of kristallen gevormd worden in stabiele evenwichtstoestanden, geeft het leven zich gewonnen, of, beter gezegd, krijgt het geen kans. Maar waar in vloeibare toestand en in chemisch niet-evenwicht de mogelijkheid bestaat voor activiteit, wordt de onbepaaldheid benut die voortkomt uit de thermische wanorde. Alles is dan mogelijk. Er kan worden gekozen. De fluctuaties presenteren zich spontaan. De selectieregels dringen zich op. Geen enkele combinatie is voorgeschreven maar het ganse systeem zoekt en vindt een coherent gedrag. Een weg wordt ingeslagen. Leven bestaat.

Een stad leeft op een andere schaal maar het principe is gelijk. De onbepaaldheid komt voort uit de individuele vrijheden van haar bewoners (wat op zichzelf een biologische realisatie is). Ieder van ons bezit unieke eigenschappen, individuele inzichten en intenties, persoonlijke stijl en eigen denkbeelden. Daaruit resulteert een uniek gedrag dat in zijn details onvoorspelbaar is maar steeds de belofte inhoudt voor originele bijdragen. Iedere mens is daarmee een potentiële bron van vernieuwing en ontdekking. De creativiteit van een stad zit in haar bewoners en niet, voor wie eraan moest twijfelen, in de administratieve structuren of beschikkingen.

De ingevingen, ideeën en daden van elk individu zijn de fluctuaties in het systeem waaruit de innovaties voortkomen die het ganse systeem doen evolueren. Dit is de bron van elke vernieuwing. De familiale, economische en bestuurlijke relaties tussen de individuen leveren de

versterkings- en eliminatieprocessen op die deze fluctuaties ondergaan.

Dat is de taakverdeling. Er is een creatieve functie en een regulerende functie. Een eventueel overheersen van ongecontroleerde vernieuwingszucht leidt tot op hol slaande omwentelingen: chaos. Een absoluut domineren van reglementen en bepalingen leidt tot een behoudsgezind systeem waarin menselijke creativiteit verstikt.

Vrijheid

Zoals elke dissipatieve structuur is een stad en elke andere vorm van menselijke samenleving een vorm van 'orde door fluctuatie'. Maar de verruiming die het leven heeft ondergaan tijdens de lange weg van de moleculaire structuren tot de menselijke maatschappij, is meer dan een schaalvergroting. Het is ook een kwalitatieve vernieuwing. Een stad is meer dan een 'super-cel' en het menselijke culturele erfgoed meer dan een 'super-DNA'. Wat zich thans op aarde afspeelt, is nooit eerder voorgekomen, ook niet op kleinere schaal. Het is nieuw. Tijdens de evolutie van het leven werden structuren opgebouwd van toenemende complexiteit die ook een toenemende autonomie en eigenheid ontwikkelden. Een Bénard-cel kiest reeds voor een nieuwe en eigen wijze van warmtetransport, een chemische klok voor een eigen ritme, onafhankelijk van wat de omgeving oplegt. In de biologische organismen is deze eigenheid ontwikkeld tot unieke vormen van spontaneïteit en creativiteit. In de menselijke cultuur is zij tot een eigen wilsvermogen uitgegroeid.

Onbepaaldheid ligt aan de basis van het leven. De onbepaaldheid die intrinsiek is aan de instabiliteiten van een processysteem maakt de evolutie van het leven mogelijk. Met de toenemende complexiteit van het leven groeit en verandert deze onbepaaldheid zelf. In het menselijk leven treffen we een onbepaaldheid aan die gepaard gaat met een meer expliciete vrijheid dan het geval is bij moleculen en cellen. Het hoogontwikkeld zintuig- en zenuwstelsel van de mens laat gewaarwordingen van het organisme toe die zo indringend en uitdrukkelijk zijn dat ze als bewustzijn ervaren worden. In combinatie met dit bewustzijn en met het streven naar eigenheid dat vooral de meest ontwikkelde biologische structuren kenmerkt, ontwikkelde zich in de mens de vrijheid tot vrije wil.

Een mens weet, tot op zekere hoogte, wat hij wil. Hij kiest tussen de mogelijkheden die zich aanbieden. De leidende criteria zijn de eigen doelstellingen. Individuele vrije wil treedt in het maatschappelijk systeem op als bron van onzekerheid en vernieuwing. Zelf gekozen streefdoelen komen in de plaats van darwiniaanse selectiecriteria. De blinde natuur verliest verder terrein. De menselijke vrije wil is de meest expliciete ver-

werping door het leven tot hiertoe van de heerschappij der natuurwetten.

Het organiserend vermogen van een systeem dat gebouwd is op dergelijke vormen van onbepaaldheid, krijgt een heel nieuwe dimensie. Door het leven, en in het bijzonder door de mens doet een nieuwe drijfkracht zijn intrede: doelgerichtheid. Niet langer kan elk verschijnsel uitsluitend verklaard worden vanuit de oorzaak die eraan ten grondslag ligt. Ook het doel dat gerealiseerd wordt en dat in de toekomst ligt, kan mee aan de basis liggen van wat gebeurt.

De wetenschap ontkent het principe van de teleologie of doelgerichtheid. Sinds de geboorte van de moderne wetenschap tijdens de Renaissance werd het principe van de teleologie vervangen door een objectiviteitsprincipe: er bestaat geen doel dat door de natuur wordt nagestreefd; alle gebeurtenissen vloeien objectief voort uit een oorzaak (of uit quantummechanische onzekerheid, zoals er later aan toegevoegd werd). Een steen valt naar de grond omdat er zwaartekracht bestaat die elk vrij voorwerp een valversnelling geeft, en niet omdat de steen vanuit zijn natuur verlangt op de grond te liggen, zoals Aristoteles beweerde. Het succes van de wetenschap is gebaseerd op het afzweren van de Aristoteliaanse doelgerichtheid en het in de plaats daarvoor formuleren van oorzakelijke relaties.

Maar het objectiviteitsprincipe wordt al te gemakkelijk doorgetrokken tot de complexe biologische structuren, waar de traditionele wetenschappelijke methoden op meer dan één punt falen en waar rechtstreekse ervaringen in direct conflict komen met het principe. Ieder van ons, met inbegrip van wetenschapsmensen, ervaart in zich ambities en hoop. Elke mens formuleert voor zich doelstellingen en handelt overeenkomstig. Het sluiten van de ogen voor dit gegeven omdat het niet past binnen het dogma van de objectiviteit is een onredelijk en uiteindelijk onhoudbaar standpunt. Het is in wezen even onwetenschappelijk als het ontkennen van het bestaan van meteorieten, omdat het niet zou passen dat voorwerpen van steen uit de hemel neerdalen.

Het radicaal ontkennen van biologische doelgerichtheid als verklarend beginsel is een blinde plek in het moderne wetenschappelijke wereldbeeld. Het is vooral gebaseerd op het succes dat natuurkunde en scheikunde geboekt hebben door het overboord zetten van alle teleologische principes. Men wil dit succes doortrekken tot in de biologie door gebruik te maken van dezelfde werkwijze. Een andere factor is het feit dat men in de moleculaire mechanismen van de organismen geen teleologische elementen terugvindt maar wel de werkzaamheid van bekende natuurkrachten.

Het is echter perfect mogelijk dat er een doelgerichtheid bestaat op het niveau van het organisme zonder dat deze terug te vinden is in de

onderdelen ervan. Sommige eigenschappen laten zich niet ontbinden. Ook het begrip entropie kan niet tot één deeltje herleid worden, en vrijwel het geheel van de menselijke ervaringswereld moet beschreven worden met behulp van veelomvattende concepten zoals goedheid en schoonheid, die niet gereduceerd kunnen worden.

Er is geen reden om huiverig te zijn voor het opnemen van het principe van doelgerichtheid in het wetenschappelijke wereldbeeld. Integendeel, het is niet alleen onontkoombaar, denk ik, het is ook wenselijk. Alleen op deze wijze kan de mens een plaats vinden binnen dit wereldbeeld zonder tot een willoos mechanisme te worden gedegradeerd. Alleen dan bestaat een kans dat wetenschap en ethiek zo al niet geïntegreerd, dan toch verzoenbaar gemaakt worden. Om de kloof te overbruggen die sinds enkele eeuwen gegroeid is tussen natuurwetenschappen en menselijke waarden, kan het niet volstaan dat menselijke wetenschappen zich volgens het patroon van de natuurkunde ontwikkelen. Het zal ook nodig zijn dat de natuurwetenschappen elementen overnemen uit de sfeer der menselijke waarden.

De consequentie is, dat we nu onder ogen zien dat de toestand van de wereld, en van de aarde in het bijzonder, niet enkel voortspruit uit de werking van blinde natuurelementen, voorgeschreven door de wetten van de natuurkunde. Zij is voor een deel het resultaat van vrije keuzen. De aarde ondergaat niet enkel haar lot; zij grijpt zelf in, bewust en doelgericht. Onze menselijke verlangens en verwachtingen krijgen daarmee een haast kosmologische betekenis. Wat gebeurt, is wat wij willen dat gebeurt.

Met het leven deed reële vrijheid zijn intrede in de wereld. En die vrijheid neemt alle beperkingen weg van wat gerealiseerd kan worden. De aarde is onherkenbaar en onbegrijpbaar geworden voor wie haar met de rest van het heelal vergelijkt.

Het vreemde van deze planeet is het vreemde van de vrijheid. Wat de aarde overkomt, is het resultaat van haar eigen initiatief. Alles kan nu. De ambities ontwaken pas. Er is geen grens aan wat mogelijk is als vrijheid een planeet regeert.

Bij dezelfde uitgever verkrijgbaar:

Max Wildiers

DE EEUW DER ONWETENDHEID

Dit boek bevat een keuze uit de bijdragen die Max Wildiers sedert verscheidene jaren in *Standaard der Letteren* publiceerde en die alle, rechtstreeks of onrechtstreeks, betrekking hebben op de culturele revolutie die thans aan de gang is.
In deze bijdragen ging de aandacht in hoofdzaak naar auteurs die een biezondere gevoeligheid aan de dag legden voor de diepgaande veranderingen die het geestesleven in onze post-moderne tijd kenmerken. In het biezonder werd hier aandacht gevraagd voor wetenschapsmensen die over de betekenis van hun werk hebben nagedacht en ons inzicht schonken in hun wereldbeschouwing.
Met bijdragen over A. Koestler, L. Thomas, J. Eccles, D. Bohm, A. Toffler, K. Lorenz, H. Cox e.a.

172 blz.
ISBN 90 289 1042 5

In het wereldbeeld van de moderne astronomie is de aarde niet meer dan een onopvallende planeet. In niets onderscheidt zij zich wezenlijk van ontelbare andere hemellichamen. Maar deze nietige planeet is het toneel van een biologische activiteit die in het waarneembare heelal haar gelijke niet heeft. De aarde is wieg en woning van de mens en daardoor uniek. Het is de paradox van de wetenschap dat zij de aarde heeft onttroond tot een onaanzienlijk oord, en tegelijkertijd het unieke karakter ervan onder ogen moet zien.

Het Vreemde van de Aarde gaat over deze paradox. Het boek beschrijft waarom de aarde door de wetenschap wel onttroond kon worden, maar niet gedegradeerd. Te midden van de nuchtere wetenschappelijke gegevens herontdekken we de verwondering voor de aardse situatie. Er wordt afgerekend met de al te gangbare opvatting dat een planeet als de onze een normaal en veelvoorkomend produkt van de natuur zou zijn.

Maar verwondering hoeft begrip niet uit te sluiten. In dit boek wordt getracht een verklaring te vinden voor de aparte status van de aarde op basis van wetenschappelijke inzichten. Ten dele blijkt dit mogelijk. Leven is een vorm van zelf-organisatie van de materie die zich kan voordoen in chemische systemen uit evenwicht. Maar dan stuiten we op een probleem. Met het leven doet zich een nieuw verschijnsel voor in de natuur: vrijheid. En vrijheid is intrinsiek verbonden met onberekenbaarheid.

Het is niet langer mogelijk te ontkennen dat vrijheid, spontaneïteit en creativiteit waarachtige kenmerken zijn van een tot leven gekomen natuur. Met dit inzicht stuit de wetenschap echter op haar eigen grenzen. Waar vrijheid regeert, verdwijnt het klassieke ideaal om de gang van de natuur te berekenen en te voorspellen.

De aarde is ontsnapt aan het afglijden naar een toestand van evenwicht en dood. Zij volgt een eigen weg. Niemand kon voorspellen dat dit zou gebeuren. Niemand kan voorspellen hoe dit zal aflopen.

Op heldere en indringende wijze maakt de auteur duidelijk dat de mogelijkheden voor de ontwikkelingen op deze planeet vanuit natuurkundig oogpunt onbegrensd zijn. Maar wat moet gebeuren, komt niet vanuit de natuurwetten zelf. Het initiatief is aan het leven. Aan ons.

Gerard Bodifée is doctor in de Wetenschappen, gespecialiseerd in de astrofysica. Na studies in de scheikunde aan de universiteiten van Antwerpen en Gent legde hij zich toe op de sterrenkunde, in het bijzonder het probleem van de stervorming en het ontstaan van het zonnestelsel. Aan de universiteit van Brussel voerde hij onderzoekingen uit op het gebied van galactische evolutie. Momenteel is hij directeur (wnd.) van het Nationaal Planetarium te Brussel. Daarnaast is hij actief als lesgever aan volkssterrenwachten en is hij een veelgevraagd voordrachtgever. *Het Vreemde van de Aarde* ontstond uit lezingen die hij over dit onderwerp gegeven heeft.

DE NEDERLANDSCHE BOEKHANDEL / UITGEVERIJ PELCKMANS
ISBN 90 289 1080 8